

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

СИДОРЕНКО СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК [66.021.3+66.048.3] (043.5)

**ГІДРОДИНАМІКА ТА МАСООБМІН
В ДИСПЕРГУЮЧОМУ КОНТАКТНОМУ ПРИСТРОЇ
ВІДЦЕНТРОВОГО МАСООБМІННОГО АПАРАТА**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
кандидат технічних наук, доцент
Лазненко Дмитро Олексійович

Суми – 2011

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	13
1.1. Інтенсифікація процесів масообміну із застосуванням поля відцентрових сил.....	13
1.2. Конструкції відцентрового масообмінного обладнання	15
1.3. Гідродинамічні особливості формування дисперсних систем в відцентровому полі.....	24
1.4. Закономірності масообміну в дисперсних системах.....	28
1.5. Висновки, постановка задачі досліджень.....	33
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	36
2.1. Вибір та обґрунтування напряму досліджень.....	36
2.2. Загальна методика проведення досліджень.....	38
2.3. Конструкція експериментального стенда.....	38
2.4. Визначення гідродинамічних характеристик апарата.....	41
2.4.1. Визначення перепаду тиску.....	42
2.4.2. Дослідження гідродинаміки рідини.....	45
2.5. Методика дослідження масообмінних характеристик ВМА.....	47
2.6. Оцінка похибки методики досліджень і похибок вимірів.....	48
2.7. Висновки до другого розділу.....	51
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО МАСООБМІННОГО АПАРАТА.....	53
3.1. Фізична модель взаємодії фаз.....	53
3.2. Математична модель руху газу в контактному пристрої ВМА...	55
3.3. Теоретичні дослідження гідродинаміки руху рідини в контактному пристрої ВМА.....	65
3.3.1. Формування дисперсної фази в контактному пристрої ВМА...	65
3.3.2. Рух крапель рідини в вільному об'ємі контактного пристрою	71

	3
3.3.5. Захоплення рідини на контактному елементі.....	74
3.4. Висновки до третього розділу.....	79
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА МАСООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО МАСООБМІННОГО АПАРАТА.....	81
4.1. Дослідження гідродинаміки газової фази в ВМА.....	81
4.2. Дослідження гідродинаміки рідини в контактному пристрої відцентрового масообмінного апарата.....	88
4.3. Експериментальні дослідження масообмінних характеристик роботи ВМА.....	96
4.3.1. Масовіддача в газовій фазі.....	96
4.3.2. Масовіддача в рідині.....	100
4.4. Оброблення та узагальнення експериментальних даних.....	103
4.4.1. Перепад тиску в ВМА.....	104
4.4.2. Масообмінні характеристики роботи апарата.....	107
4.5. Висновки до четвертого розділу.....	109
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ АПАРАТА	111
5.1. Стан питання.....	111
5.2. Схема дослідно-промислової установки.....	113
5.3. Методика проведення досліджень.....	117
5.4. Результати іспитів ВМА в промислових умовах.....	118
5.5. Методика інженерного розрахунку ВМА.....	123
5.5.1. Визначення масообмінних характеристик та геометричних розмірів апарата.....	124
5.5.2 Визначення швидкості обертання.....	125
5.5.3. Визначення гідравлічного опору.....	126
5.6. Висновки до п'ятого розділу.....	127
ВИСНОВКИ.....	128
ДОДАТКИ.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення

F – сила, Н;

G, L – витрата газу та рідини відповідно, м³/с;

d – діаметр, м;

w – швидкість, м/с;

n – частота обертання ротора, об/хв;

ω – кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

r, r_0, R – радіус контактної пристрою: поточний, внутрішньої поверхні та периферії відповідно, м.

h – ширина контактної пристрою, м;

l – характерний лінійний розмір, м;

β_x, β_y – коефіцієнт масовіддачі в рідині та газі відповідно, кмоль/м²·с;

N_x, N_y – число одиниць переносу в рідині та газі відповідно;

h_x, h_y – висота одиниці переносу в рідині та газі відповідно, м;

D – коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²·с;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

ρ – густина, кг/м³;

$Nu = \beta l / D$ – критерій Нусельта;

$Re = \frac{wl\rho}{\mu}$ – критерій Рейнольдса;

$Pr = \mu / \rho D$ – критерій Прандтля;

$Sc = \nu/D$ – критерій Шмідта;

$Pe = w l/D$ – критерій Пекле.

Скорочення

ВМА – відцентровий масообмінний апарат;

КУР – кількість утримуваної рідини;

ПКФ – поверхня контакту фаз.

Символи

p – для рідкої фази;

g – для газової (парової) фази;

$сух$ – для сухого контактного пристрою;

$зрош$ – для зрошеного контактного пристрою;

k – для краплі;

$сер$ – середній;

$мод$ – модальний;

$кр$ – критичний;

$гр$ – граничний;

$відн$ – відносне значення;

ω – відцентровий;

r – радіальний;

φ – коловий.

ВСТУП

Інтенсифікація та підвищення продуктивності технологічних процесів є актуальною задачею для розвитку промислового виробництва України. На фоні постійного зростання вартості енергетичних ресурсів пріоритетним напрямком сучасного розвитку нашої держави є розробка та впровадження енергоефективних процесів і технологій, пошук нових способів інтенсифікації технологічного обладнання [1].

Процеси масообміну займають значне місце в структурі технологічних процесів різних виробництв, їх інтенсифікація є важливим завданням для вдосконалення виробництва, поліпшення якості продукції, зменшення її собівартості, раціонального використання природних ресурсів та охорони навколишнього середовища.

Перспективним напрямком підвищення ефективності масообмінних процесів є накладання на взаємодіючі фази поля зовнішніх сил, в тому числі використання відцентрового поля. Конструктивно застосування відцентрових сил в масообмінних процесах реалізується в відцентрових масообмінних апаратах (ВМА).

Сьогодні є різні підходи до створення таких апаратів, відома достатня кількість конструкцій. В останній час ряд досліджень присвячений конструктивній схемі протитечійного ВМА, що складається з перфорованого обертового ротора, встановленого в середині циліндричного корпусу [2, 3]. В такому ВМА є можливість встановлення в середині ротора різних конструкцій контактних пристроїв, що забезпечує широку сферу застосування обладнання та можливість його вдосконалення. На сьогодні розроблені і досліджені ряд контактних пристроїв для ВМА як українськими [4–8] так і закордонними [9–20] вченими.

В той же час існуючі рішення не достатньо повно вивчені та мають значний потенціал для подальшого вдосконалення і розширення сфер застосування. Це складає перспективний напрям подальших досліджень.

Актуальність теми. Сучасний стан промислового виробництва України вимагає створення вискоелективного масообмінного обладнання для застосування в різних його галузях. Перспективним напрямом інтенсифікації масообмінних процесів є використання поля відцентрових сил. На сьогодні є різні підходи до створення відцентрових масообмінних апаратів, відомо достатньо багато конструкцій. В той же час значна частка існуючих апаратів цього класу не достатньо повно вивчені, мають значний потенціал для подальшого вдосконалення і розширення сфер застосування. Одним з шляхів подальшої інтенсифікації є розробка та дослідження нових вискоелективних контактних пристроїв для відцентрових масообмінних апаратів.

Таким чином, створення нової конструкції контактної пристрою відцентрового масообмінного апарата з метою підвищення ефективності роботи обладнання є актуальною задачею, яка потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Сумському державному університеті за планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології, пов'язаних з тематиками: «Екологічні проблеми хімічної технології, розроблення прогресивних технологій та обладнання хімічних виробництв» (№ державної реєстрації 0105U002469) та «Розробка високоінтенсивного масообмінного обладнання для створення маловідходних технологій» (№ державної реєстрації 0106U013008).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей гідродинаміки та масопереносу в відцентровому масообмінному апараті з контактним пристроєм у вигляді набору сітчастих кільцевих контактних елементів, установлених коаксійно з кроком один від одного, що забезпечує організацію взаємодії фаз у режимі багатостадійного диспергування рідини.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- отримання фізичної моделі взаємодії фаз в розробленому контактному пристрої;
- математичний опис гідродинамічних закономірностей взаємодії фаз у контактному пристрої ВМА;
- експериментальні дослідження гідродинаміки та масообміну в ВМА залежно від конструктивних параметрів контактної пристрою та режимних параметрів роботи апарата;
- перевірка й уточнення отриманих теоретичних залежностей експериментальним шляхом на модельних системах;
- створення інженерної методики розрахунку відцентрового масообмінного апарата та визначення основних вимог до ВМА під час його роботи;
- дослідно-промислова апробація та впровадження розробленого апарата в промисловість.

Об'єкт дослідження – гідродинаміка та масообмін у контактному пристрої ВМА.

Предмет дослідження – контактний пристрій для ВМА.

Методи дослідження. Математичне моделювання виконане на підставі класичних положень механіки суцільного середовища та технічної гідромеханіки з використанням систем комп'ютерної математики Maple 12 та MathCAD 11. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень гідродинамічних та масообмінних характеристик на лабораторній моделі ВМА з контактним пристроєм досліджуваної конструкції. В процесі експериментальних досліджень використовувалися методи візуального спостереження та швидкісного фотографування поведінки рідини всередині контактної пристрою, визначення гідродинамічних характеристик газу методами інструментальних вимірювань, методи хімічного аналізу для одержання масообмінних показників роботи апарата. Обробка результатів експериментів, порівняння з теоретичними моделями та визначення похибок проведено за допомогою методів математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані наступні наукові результати:

- уперше розроблено фізичну та математичну модель гідродинаміки газової фази в контактному пристрої ВМА, в якій враховано вплив на гідродинаміку газу вхідної ділянки ротора та конструктивних характеристик контактної пристрою;

- на базі існуючих уявлень про механізми диспергування рідини вперше розроблена фізична та математична модель процесу утворення крапель у диспергуючому контактному пристрої ВМА з урахуванням особливостей формування крапель на сітчастій поверхні в полі відцентрових сил при протитечійному русі газу;

- уперше експериментально досліджено гідродинаміку фаз в ВМА з диспергуючим контактним пристроєм розробленої конструкції. Експериментально отримані залежності та коефіцієнти для розрахунку дисперсних характеристик рідкої фази, швидкості газу та перепаду тиску в апараті;

- уперше досліджені масообмінні характеристики у відцентровому апараті з диспергуючим контактним пристроєм та отримані залежності для визначення коефіцієнта масовіддачі в контактному пристрої ВМА. Визначена рекомендована величина кроку між елементами в контактному пристрої, при якій забезпечуються високі масообмінні показники роботи апарата.

Практичне значення одержаних результатів:

- на базі отриманих залежностей для визначення гідродинамічних та масообмінних характеристик розроблена інженерна методика розрахунку ВМА з контактним пристроєм у вигляді набору сітчастих кільцевих контактних елементів, установлених коаксійно з кроком один від одного;

- розроблено високоефективний контактний пристрій для протитечійного відцентрового масообмінного апарата, що працює в режимі

багатостадійного диспергування рідини (отримано патент України на корисну модель);

- результати досліджень та отримана інженерна методика використані для розрахунку дослідно-промислової установки для утилізації відходу виробництва ацетату етиленгліколю на ТОВ «Шостка-Хімпродукт», м. Шостка Сумської області.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструкції контактної пристрою, проведенні математичного моделювання гідродинаміки газу, умов формування та руху дисперсної фази в контактному пристрої ВМА, підборі й апробації методик експериментальних досліджень гідродинаміки та масообміну, проектуванні та монтажі експериментального стенда, обробці та узагальненні отриманих результатів. Здобувач брав участь на всіх етапах робіт з проектування та виготовлення дослідно-промислового зразка ВМА з контактним пристроєм розробленої конструкції, а також у виконанні монтажних-налагоджувальних робіт та виведенні на робочі режими апарата під час його дослідно-промислової експлуатації у якості відповідального виконавця.

У наукових статтях та працях за темою дисертації, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному:

- в роботі [37] проведений аналіз режимів розпилювання рідини в залежності від величини відцентрової сили в контактному пристрої;

- в роботі [38] проведений аналіз існуючих способів організації взаємодії фаз та формування поверхні контакту в контактних пристроях відцентрових апаратів;

- в роботі [76] проведена експериментальна частина роботи, виконано обробку та співставлення отриманих результатів;

- в роботі [90] виконана частина експериментальних робіт, розроблена методика обробки результатів, виконане опрацювання отриманих даних;

- в роботі [93] розроблено модель руху газу через кільцевий елемент, створено модель для розрахунку опору зрошеного контактної пристрою,

а також виконані всі розрахунки за отриманими залежностями і перевірено адекватність отриманих моделей експериментальним шляхом;

- в роботі [113] отримане рівняння для визначення ділянки стабілізації плівки рідини та залежність, що враховує вплив газу на розподіл швидкості рідини по товщині плівки;

- в роботі [114] експериментально досліджені масообмінні характеристики відцентрового масообмінного апарата, виконане математичне опрацювання результатів;

- в роботі [115] виконані експериментальні дослідження масообміну при лімітуючому опорі в газовій фазі, проведено обробку результатів експерименту;

- в роботі [119] виконаний аналіз виробництв, що є джерелами забруднення атмосфери леткими органічними сполуками з виділенням схем очищення вентиляційних викидів та потенційного місця в них відцентрового масообмінного обладнання;

- в роботі [124] виконано інженерний розрахунок дослідно-промислової установки на базі двох ВМА, проведена частина експериментальних досліджень параметрів роботи установки в промислових умовах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геоекології і раціонального природокористування Лівобережної України» в Сумському державному педагогічному університеті (м. Суми, 2006 рік), на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» в Кременчуцькому державному політехнічному університеті (м. Кременчук, 2006 рік), на IV та V Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологія. Економіка. Енергозбереження» в Сумському державному університеті (м. Суми, 2007 та 2009 роки), на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія и здоровье человека. Охрана воздушного

и водного бассейнов. Утилизация отходов» (м. Щолкіне, АР Крим, 2008 рік), на Міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы инновационных технологий в образовании и науке» в Академічному інноваційному університеті (м. Шимкент, Республіка Казахстан, 2009 рік), на Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы энергетической эффективности пищевых и химических производств» в Одеській національній академії харчових технологій (м. Одеса, 2009 рік), на XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, 2009 рік), на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (м. Суми, 2006, 2007, 2008 роки).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових працях, в тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, 2 статті в збірниках наукових праць. Отриманий 1 деклараційний патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел з 124 найменувань. Повний обсяг дисертацій становить 179 сторінок, серед яких 128 сторінок основного тексту, 11 таблиць, 74 рисунки.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Інтенсифікація процесів масообміну із застосуванням поля відцентрових сил

В структурі масообмінних процесів значна їх кількість проводиться в газорідних системах. Серед робіт спрямованих на підвищення масообмінних характеристик технологічного обладнання, в якому забезпечується взаємодія фаз газ-рідина, можна виділити два напрями. Перший полягає у збільшенні питомої поверхні контакту фаз, другий – у збільшенні швидкості переносу речовини з ядра до границі розділу фаз (або від границі до ядра) та зменшення опору границі розділу фаз [21-24]. Хоча вирішення цих задач часто поєднується при розробленні нових конструкцій масообмінного обладнання або його контактних пристроїв, вони мають різні фізичні механізми реалізації.

Реалізація першого та другого напрямку інтенсифікації процесів масообміну в газорідних системах досягається при організації контакту фаз в режимі диспергування рідини. Суттєвий потенційний ресурс такого способу інтенсифікації показано в дослідженнях українських та закордонних вчених [3, 12, 14, 17, 21, 25-27, 30-34]. При цьому є потенціал як для підвищення питомої поверхні контакту фаз (в порівнянні з плівковою взаємодією) так і інтенсифікації за рахунок зниження опору масопереносу на міжфазній поверхні.

Дослідники відзначають багато переваг такого способу проведення процесу. Але ефективно його використання лімітується застосуванням протитечійної організації руху фаз внаслідок достатньо вузького діапазону існування стійких режимів взаємодії фаз і швидким початком бризковинесення.

Для створення розвинутої поверхні контакту фаз в робочому об'ємі апарата з метою інтенсифікації процесів масообміну застосовують підведення в систему зовнішньої енергії.

Апарати, в яких додаткова енергія передається взаємодіючим фазам через обертовий ротор являють окремих клас з характерними особливостями організації взаємодії фаз [23, 34–36]. При чому механізм впливу ротора в різних конструкціях роторних апаратів відрізняється.

Одним з напрямів розвитку роторного масообмінного обладнання є апарати в яких організація взаємодії фаз відбувається всередині обертового ротора. Функція ротора в таких апаратах фактично полягає у накладанні на контактуючі фази поля масових сил (відцентрового поля). Відцентрові сили, що діють на взаємодіючі фази в середині ротора, на порядки перевищують значення гравітаційних сил і є визначальними в організації руху та режимів гідродинамічної взаємодії фаз [35–39].

Збільшення величини масових сил, в полі яких організовано взаємодію фаз, впливає на гідродинамічну обстановку і відповідно на масоперенос. Накладання поля відцентрових сил призводить до зменшення товщини плівки рідини, зменшення діаметру краплин та розширенню діапазону стійкої роботи при організації протитечійної взаємодії фаз.

Збільшення питомої поверхні контакту взаємодіючих фаз за рахунок потоншення плівки та зменшення розміру крапель рідини є одним з суттєвих факторів, що спричиняють зростання масообмінних характеристик роторного обладнання даного класу.

Питома поверхня контакту фаз диспергованої рідини підвищується зі зменшенням розміру краплі. Але відомо [25, 29, 32, 33], що відбувається зниження інтенсивності внутрішньої циркуляції рідини в середині краплі при зменшенні її розміру, що відповідно знижує перенос маси всередині краплі. В умовах, коли перенос лімітується в рідкій фазі, це є обмежуючим фактором при застосуванні такого способу інтенсифікації і його необхідно враховувати.

1.2. Конструкції відцентрового масообмінного обладнання

Спроби інтенсифікації масопереносу при використанні відцентрових сил здійснювалися багатократно. Перші масообмінні апарати, в яких використовувалося накладання на взаємодіючі фази поля відцентрових сил, відомі з початку ХХ ст. [42, 43].

Згідно запропонованій В.В. Кафаровим [35] класифікації тепломасообмінного обладнання, відцентрові (роторні) масообмінні апарати відносяться до класу обладнання з зовнішнім підведенням енергії. В межах цього класу, в свою чергу, по способу утворення поверхні контакту виділяють:

- 1) апарати з фіксованою поверхнею контакту фаз (плівкові апарати);
- 2) апарати з поверхнею контакту, що утворюється в вільному об'ємі;
- 3) апарати з фіксованою поверхнею та поверхнею, що утворюється в вільному об'ємі.

В плівкових апаратах інтенсифікація масообміну досягається за рахунок безперервного оновлення під дією відцентрового поля поверхні контакту фаз у вигляді тонкої плівки. Широко відомою конструкцією такого обладнання є серія апаратів Подбельняка [44-50]. Це апарати протитечійного типу в яких організація руху фаз здійснюється в спіралеподібному каналі (рис.1.1). Канал утворений металевою стрічкою, згорнутою по спіралі Архімеда та зафіксованою між двома торцевими дисками. Апарати Подбельняка вперше були запропоновані в 30-х роках ХХ ст. та успішно використовувались в різних виробництвах.

Відомим недоліком плівкових апаратів Подбельняка є недостатня змочуваність поверхні насадки, за рахунок чого фактична площа контакту фаз менше геометричної поверхні насадки. Для його усунення в Державному інституті азотної промисловості СРСР (ДІАП) була створена та досліджена інша конструкція плівкового тепломасообмінного апарата. Апарат являє собою набір відбортованих концентричних циліндрів, які мають перетоки для рідини та пари (рис.1.2). Такий спосіб організації процесу дає повне

змочування обертових поверхонь, більш інтенсивне внутрішньофазове перемішування та відповідне збільшення масообмінних характеристик в порівнянні з апаратами Подбельняка [51].

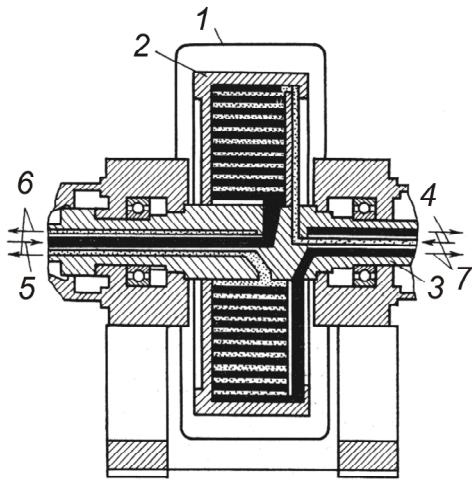


Рис. 1.1. Схема відцентрового апарата Подбельняка: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – вал; 4, 5 – вхід легкої та важкої фракції відповідно; 6, 7 – вихід легкої та важкої фракції відповідно

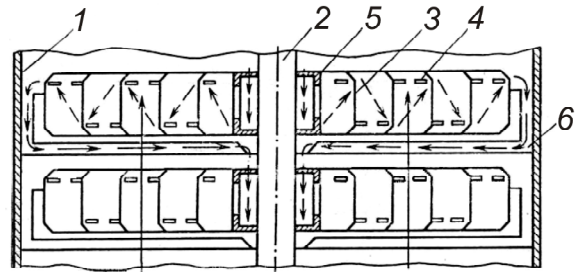


Рис. 1.2. Відцентровий апарат конструкції ДІАП: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – коаксійні циліндри; 4 – перфорація; 5 – розподільчий пристрій; 6 – переливна тарілка

Апарати з поверхнею контакту, що утворюється в вільному об'ємі, відомі достатньою кількістю масообмінного обладнання. Класичними представниками цього напрямку є розробки П.Л. Капіци [52] та М.І. Гельперіна [53]. В цих роторних колонах рідина з нерухомої перегородки стікає на обертові елементи, на яких відбувається її диспергування. Рідина контактує з паром в вільному об'ємі апарата і по внутрішній частині корпуса стікає на наступний обертовий елемент. Пара взаємодіє з рідиною, проходячи через кільцеві зазори, утворені рухомими та нерухомими частинами апарата (рис.1.3).

Відомим прикладом відцентрових масообмінних апаратів є роторні ректифікаційні колони Кіршбаума-Штора. Вони були широко розповсюджені в ряді країн світу, серійно випускалися в СРСР (рис.1.4).

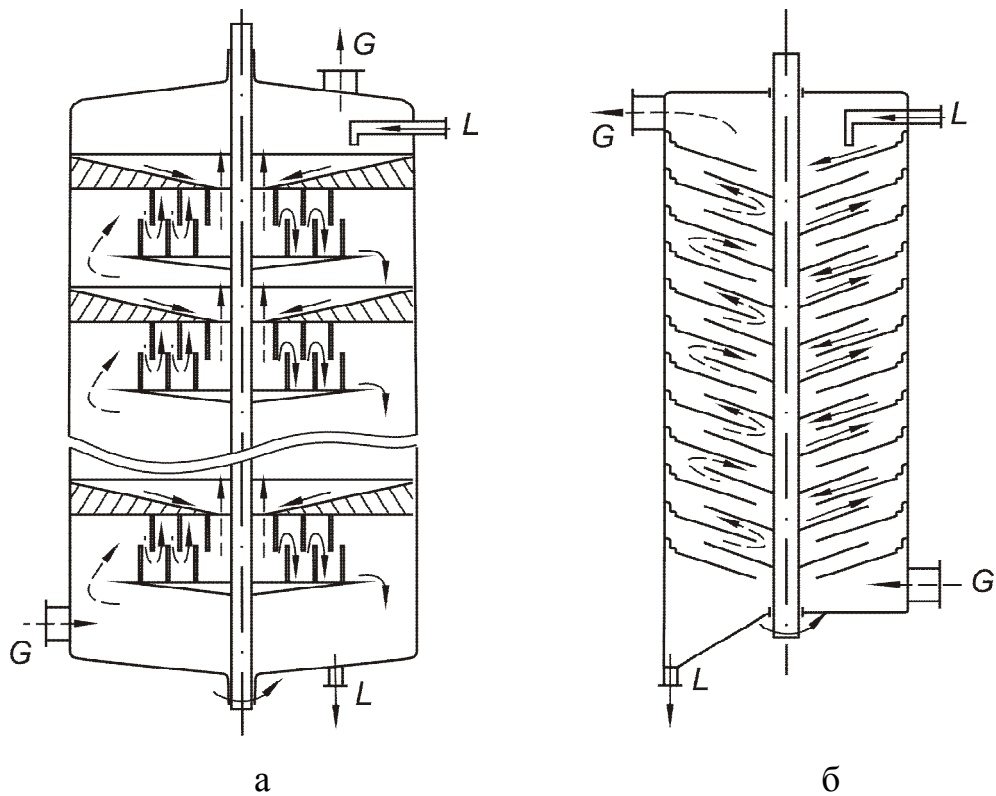


Рис. 1.3. Відцентровий тепломасообмінний апарат П.Л. Капіци (а) та відцентровий ректифікатор М.І. Гельперіна (б)

У колоні на кожній ступені рідина диспергується конусами, що обертаються, контакт з паровою фазою на кожній ступені перехрестнотечійний, в цілому по апарату схема протитечійна. Істотними недоліками колони такого типу є значний винос крапель, що зростає при зниженні остаточного тиску. Також практична експлуатація показала різке падіння ефективності із зростанням діаметру колони [35].

Відома конструкція роторного апарата В.С. Ніколаєва, який був досліджений в роботі [54]. В апараті диспергування рідини забезпечувалося в об'ємі, що обмежується обертовою та необертовою тарілкою (рис.1.5). На одній ступені встановлено декілька таких пар тарілок, це забезпечує багатократне оновлення поверхні контакту фаз. Апарат має високу ефективність, але при цьому відносно невелику пропускну здатність.

Аношиним [55, 56] проведено удосконалення апарата В.С. Ніколаєва, яке побудоване на ефекті зростання масовіддачі при тангенційному ударі

крапель в порівнянні з перпендикулярним ударом. Конструктивно це реалізовано заміною нерухомих циліндричних перегородок в апараті Ніколаєва на радіальні лопатки (рис.1.6). Проведені Аношиним дослідження показали збільшення ефективності масопередачі такої конструкції.

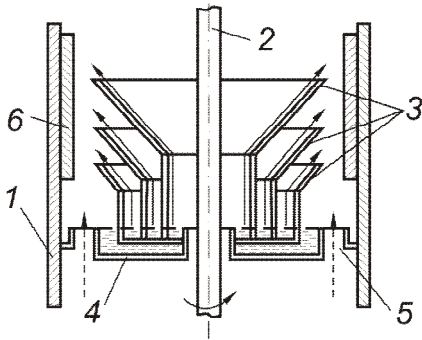


Рис. 1.4. Колона Кіршбаума-Штора:
1 – корпус; 2 – вал; 3 – конуси; 4 – тарілка; 5 – паровий патрубок; 6 – відбивне кільце

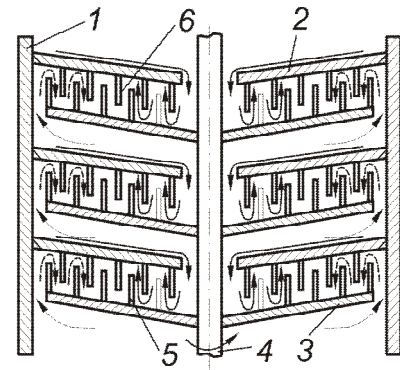


Рис. 1.5. Апарат конструкції В.С. Ніколаєва: 1 – корпус; 2 – нерухома тарілка; 3 – обертова тарілка; 4 – вал; 5, 6 – перегородки

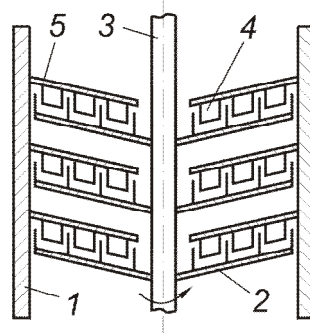


Рис. 1.6. Апарат конструкції І.М. Аношина: 1 – корпус; 2 – обертова тарілка; 3 – вал; 4 – лопатка; 5 – нерухома тарілка

В роботі [57] запропонований та досліджений роторний масообмінний апарат, за принципом дії схожий на апарат Аношина. В цій конструкції також забезпечується багатократне диспергування рідини на коаксійних жолобах та багатократний удар краплин по дотичній, що інтенсифікує процес масообміну (рис.1.7).

Третя група відцентрових апаратів (за класифікацією Кафарова) в більшості представлена конструкціями, що складаються з набору послідовно встановлених обертових та нерухомих конусів, циліндрів або дисків з відносно невеликим кроком. Прикладом такого апарата є конструкція, представлена на рис.1.8. Рідина під впливом сили тяжіння стікає з нерухомого конуса на обертовий. На обертовому елементі рідина у вигляді плівки рухається до периферії та диспергується в кільцевому просторі між конусами. Пара контактує з рідиною проходячи протитоком через кільцеві зазори. Такі апарати мають високу розділову здатність, але обмежені у продуктивності [35].

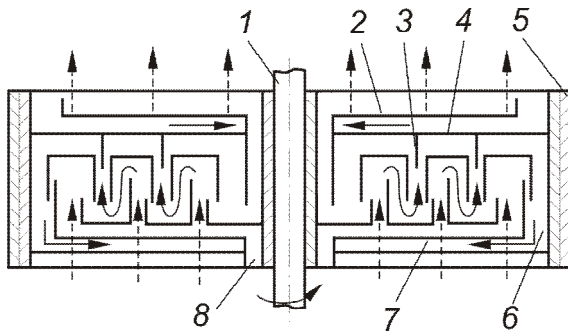


Рис. 1.7. Апарат, запропонований Є.М. Карих: 1 – вал; 2 – живлячий диск; 3 – кільцеві жолоби; 4 – з'єднувальні планки; 5 – корпус; 6 – кільцевий карман статору; 7 – радіальні переточні жолоби; 8 – зливний стакан статору

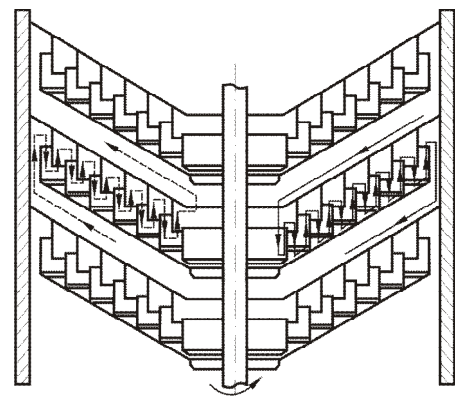


Рис. 1.8. Конструкція апарата з багатократним диспергуванням рідини та руйнуванням утвореної дисперсної фази при ударі [35]

Конструкція роторної колони з організацією багатократного диспергування рідини, запропонована в [58], схема якої наведена на рис.1.9, складається з конічних тарілок, встановлених на обертовому валу, на яких змонтовані контактні елементи у вигляді концентричних кілець. В корпусі встановлені тарілки-статори, на які закріплені контактні елементи у вигляді

кілець трикутного перетину. Така конструкція забезпечує багатократне диспергування рідини та руйнування диспергованого потоку на елементах статора, при чому удар крапель відбувається по дотичній, що дозволяє більш повно використати кінетичну енергію крапель.

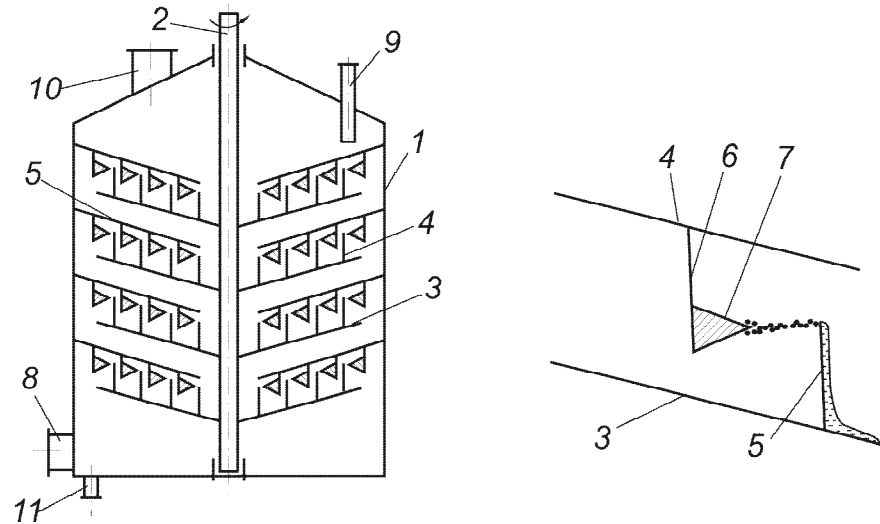


Рис. 1.9. Роторна колона з багатократним диспергуванням рідини [58]:
1 – корпус; 2 – вал; 3 – тарілки-ротори; 4 – концентричні кільцеві елементи;
5 – тарілки-статори; 6 – опора; 7 – кільцеві контактні елементи;
8, 9 – патрубки подачі газу та рідини відповідно; 10, 11 – патрубки
відведення газу та рідини відповідно

В останні десятиріччя в світі різними групами вчених ведуться дослідження відцентрового апарата, конструкція якого була вперше запропонована проф. Коліном Рамшау (Colin Ramshaw) [2, 3]. Дана конструкція (рис.1.10) складається з обертового перфорованого циліндричного ротора, встановленого в середині нерухомого корпуса, в якому встановлені патрубки для вводу та відведення фаз. Взаємодія фаз відбувається в протитечійному режимі. Таке конструктивне рішення дозволяє використовувати різні типи контактних пристроїв, що встановлюються в середині обертового ротора. При цьому конструкція безпосередньо апарата залишається незмінною, а за рахунок удосконалення контактних пристроїв можливе підвищення ефективності роботи обладнання.

На наш погляд подібна конструкція не може бути однозначно віднесена до певної групи за класифікацією Кафарова. В залежності від типу контактної пристрою, що встановлюється в середині ротора, цей апарат може відноситися то того чи іншого типу. З такої позиції можна сказати, що ВМА з перфорованим ротором є окремою групою відцентрового масообмінного обладнання. В закордонній літературі апарати такого типу (і взагалі технологія організації процесу в такому обладнанні) отримала назву «HiGee» (від англ. аббревіатури HG – high gravity, висока гравітація).

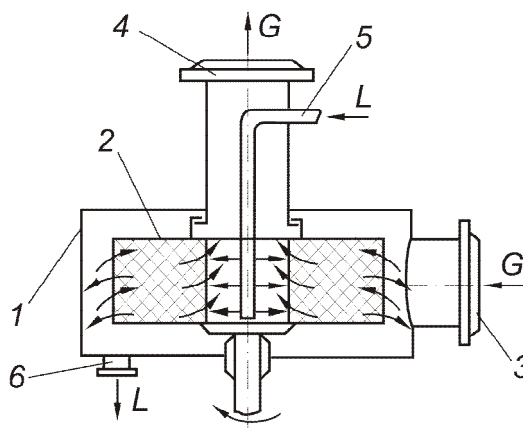


Рис. 1.10. Апарат «HiGee»: 1 – обертовий ротор; 2 – корпус; 3, 4 – патрубок для вводу та виведення газу відповідно; 5, 6 – патрубок для вводу та виведення рідини відповідно

Детальні експериментальні дослідження роторного апарата на базі описаної конструкції проведені в роботі [4]. Автором розроблені та досліджені три типи контактних елементів для цього апарата (рис. 1.11).

В контактних елементах «а» та «б» (рис. 1.11) взаємодія фаз відбувається на поверхні плівки рідини, яка формується на гофрованих сітчастих елементах (дисках та блоках відповідно). В третьому типі насадки (рис. 1.11 «в») взаємодія фаз сумісно в плівково-крапельному режимі, плівка на поверхні спіральних елементів та диспергування рідкої фази в просторі між ними.

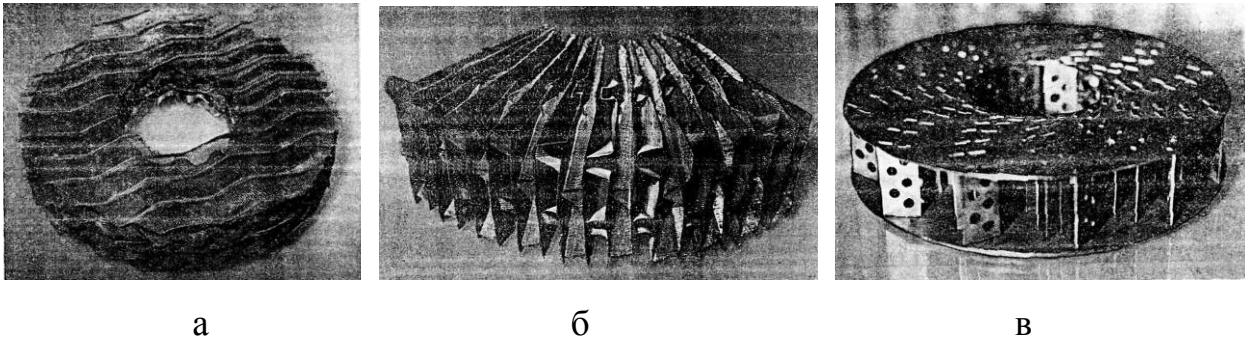


Рис. 1.11. Контактні елементи для відцентрового апарата [4], що складаються: а – з гофрованих дисків; б – з радіальних блоків; в – з перфорованих пластин

Авторами [59] запропонована конструкція контактної пристрою для апарата HiGee. Пристрій являє собою набір радіально встановлених лопаток, на яких відбувається багатократне диспергування рідини в об'ємі ротора (рис. 1.12). Ідея, закладена авторами в цьому конструктивному рішенні, на наш погляд достатньо цікава, але дані щодо подальших досліджень характеристик роботи апарата з таким пристроєм відсутні.

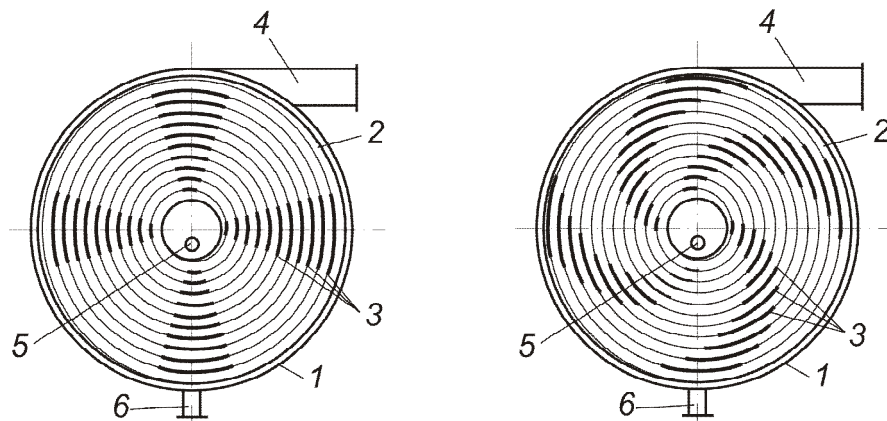


Рис. 1.12. Відцентровий апарат з радіальними лопатками [59]: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – лопатки; 4 – патрубок подачі газу; 5 – патрубок подачі рідини; 6 – патрубок відведення рідини

Над розробкою та дослідженням відцентрових масообмінних апаратів та контактних пристроїв до них працює група китайських вчених. Дослідження ведуться навколо пакетів контактних пристроїв, виконаних з матеріалів з

високою питомою поверхнею – вспінені та пористі метали, пакети з щільно укладеної металеві сітки, пористі та волокнисті полімерні матеріали і т.д. [9-11, 15, 16, 18, 20].

Достатньо оригінальна конструкція ректифікаційної установки на базі відцентрового масообмінного апарата HiGee (рис. 1.13) запропонована індійськими дослідниками [12, 17] під керівництвом професора Рао (D.P. Rao). Корпус відцентрового апарата суміщений з випарним кубом, що знижує матеріалоємність установки, втрати теплоти і загальні габарити.

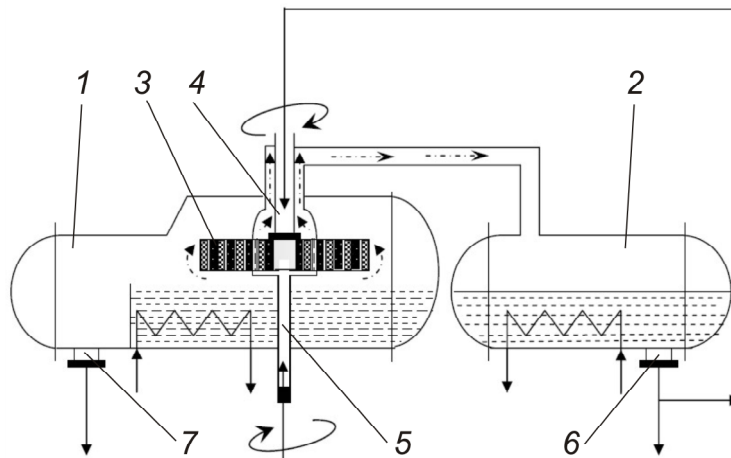


Рис. 1.13. Схема ректифікаційної установки на базі апарата HiGee, запропонована D.P.Rao [12]: 1 – випарник, суміщений з корпусом відцентрового апарата; 2 – конденсатор; 3 – ротор з насадкою; 4,5 – вали; 6, 7 – патрубки відведення дистиляту та кубового залишку відповідно

Контактний пристрій для цього апарата являє собою 2 пакети з пористого матеріалу, виконаних у вигляді набору циліндрів на відстані один від одного. Пакети встановлені на окремих валах і суміщені в контактному пристрої таким чином, що кожен циліндричний елемент одного пакету входить в простір між двома сусідніми іншого. Вали при цьому обертаються в протилежних напрямках. Така конструкція дозволяє інтенсивно перемішувати фази та оновлювати поверхню контакту на межі сусідніх циліндричних елементів, що інтенсифікує масоперенос. Недоліком такої

схеми є відносна складність конструкції, пов'язана з двома системами обертання.

Наведені дані показують, що на сьогодні розроблено достатньо широкий спектр конструкцій відцентрового масообмінного обладнання. При цьому в останній час різними дослідниками приділяється увага до протитечійного апарата з перфорованим ротором, відомого в закордонній літературі як HiGee. Виконані роботи в цьому напрямку показують надійність та ефективність цього конструктивного рішення.

Конструкція цього апарата виділяється значною гнучкістю за рахунок можливості встановлення в середині ротору різних насадкових елементів. На теперішній час вже розроблена певна кількість контактних пристроїв для ВМА з перфорованим ротором. Але при цьому залишається потенціал для подальшого удосконалення такого обладнання та розширення напрямків його застосування шляхом створення та дослідження нових типів контактних елементів.

1.3. Гідродинамічні особливості формування дисперсних систем в відцентровому полі

Існує багато методів отримання дисперсного потоку, в тому числі з застосуванням відцентрового поля. Широко досліджені методи розпилювання рідини за допомогою різного типу форсунок (гідравлічних, пневматичних, відцентрових, струминних та ін.), також відомі методи механічного, акустичного, ультразвукового, електростатичного, пульсаційного, електрогідравлічного отримання дисперсного потоку рідини.

Накладання на рідину енергії відцентрового поля використовується при механічному розпилюванні рідини. В якості розпилюючих пристроїв відомі різні конструкції дискових елементів, перфорованих та пористих обертових розпилювачів барабанного типу [27, 28, 32].

Автори [29] при дослідженні механізмів диспергування на обертових дисках та барабанах показали, що в залежності від витрати рідини існують

три режими розпилювання (рис.1.14). При малій витраті рідини краплі формуються на поверхні рідинного кільця, що існує на периферії диску (барабану). В другому режимі з рідинного кільця на крайці витягуються «нитки» рідини, які на певній відстані від розпилювача руйнуються з утворенням крапель. Автори відмічають також, що в цьому режимі при певній витраті рідини кількість «ниток» досягає постійного значення. При подальшому збільшенні витрати рідини настає третій режим, що характеризується утворенням плівки, яка розпадається на краплі різних розмірів.

В цій же роботі автори наводять залежності для характеристики переходу між режимами та наводять аналіз рівнянь для визначення продуктивності розпилення.

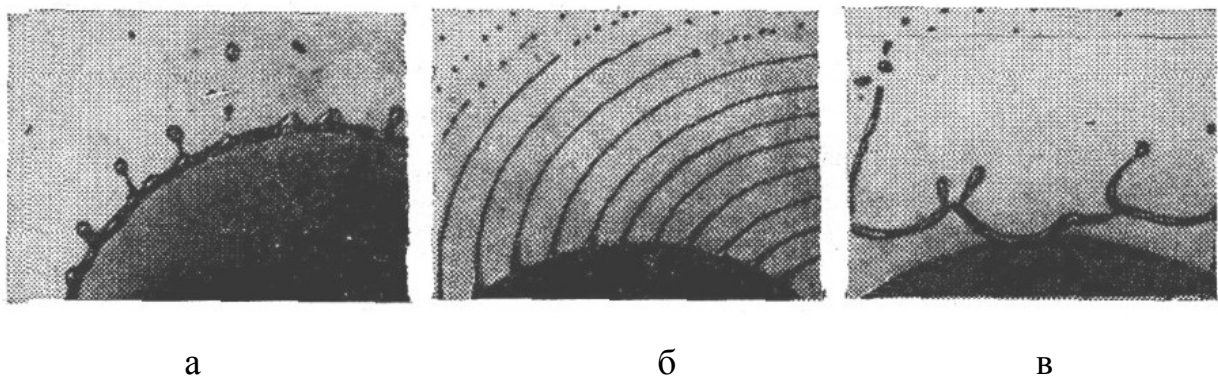


Рис. 1.14. Режими диспергування рідини на обертовому диску [29]

Розпилювання рідини обертовими дисками при достатній продуктивності процесу має високий показник полідисперсності потоку. Для отримання монодисперсного розпилювання авторами [28] проаналізовано ряд робіт. В результаті отримано висновок, що перспективним є використання в обертовому розпилювачі пористого матеріалу, що має регулярну структуру як за розмірами утворюючих його зерен, так і за розмірами пор (живлячих каналів). Зрозуміло, що використання подібних пристроїв можливе для рідин, що не містять механічних домішок.

Дослідження процесу витікання рідини з пористого обертового розпилювача (ПОР) дозволили виявити три характерні режими [28]: з утворенням рідинного кільця на окрайці, струменевий та крапельний (рис. 1.15).

Перший та другий режими (рис. 1.15а та 1.15б) ідентичні першим двом режимам диспергування на обертовому диску. Межа існування першого режиму визначена на швидкості обертання зовнішньої поверхні розпилювача 0,8-1,2 м/с. Другий режим (струменево-плівковий) характеризується більш рівномірним розподілом плівки по поверхні. З плівки витягуються струмені, при розпаді яких утворюються краплі рідини. Цей режим існує в межах швидкостей обертання 2 – 12 м/с.

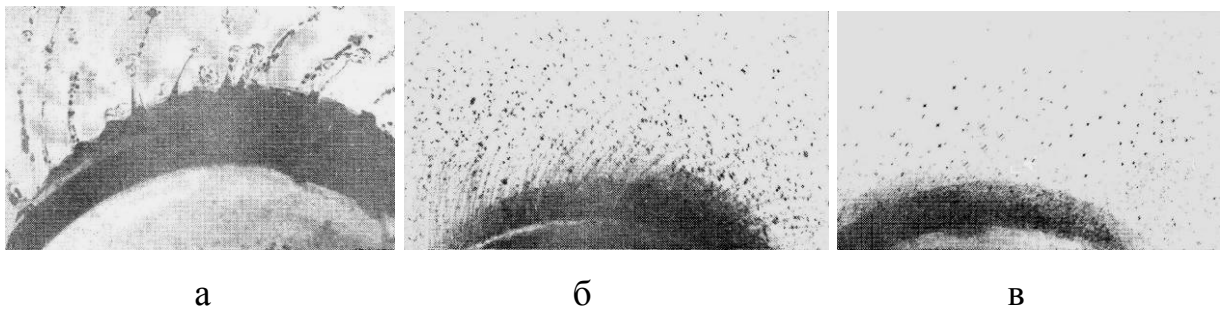


Рис. 1.15. Режими диспергування в ПОР [28]

При швидкостях обертання більше 12 - 20 м/с (в залежності від розміру зерна розпилювача) настає крапельна фаза диспергування. Струмені повністю зникають, диспергована рідина характеризується мінімальним ступенем полідисперсності.

Більш повні результати отримано при дослідженні гідродинаміки пористих обертових розпилювачів в [60]. Встановлено, що в третьому режимі краплеутворення відбувається на поверхні зерен матеріалу розпилювача при їх змочуванні, та з пор – при незмочуванні (рис. 1.16).

За результатами обробки експериментальних даних диспергування в пористому обертовому розпилювачі в крапельному режимі отримана залежність для розміру крапель [28]

$$d_k = 0,52 \left(\frac{6 d_3 \sigma}{\rho \omega^2 R} \right)^{1/3}, \quad (1.1)$$

де d_3 - діаметр зерна пористого розпилювача, м;

R - зовнішній радіус розпилювача, м.

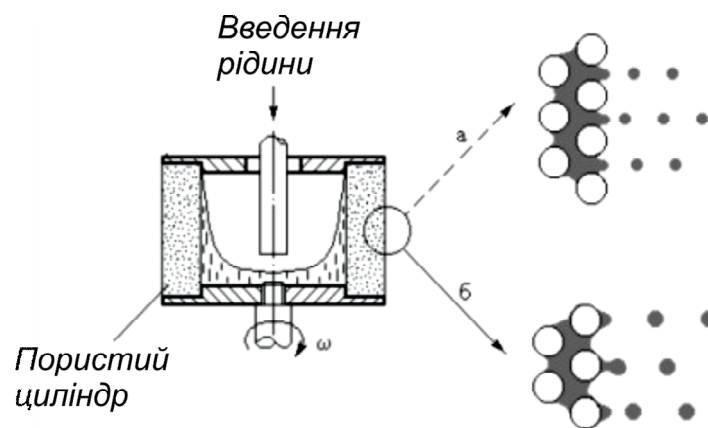


Рис. 1.16. Механізми краплеутворення при диспергуванні в ПОР: а – при незмочуванні матеріалу розпилювача; б – при змочуванні [60]

Отримання потоку крапельної рідини з високою монодисперсністю досягається при застосуванні перфорованих обертових оболонок, дослідження конструкцій та роботи яких проведені Б.Г. Холіном [30]. Їх використання крім розпилювання рідини можливе для грануляції розплавів з отриманням близького до однакового розміру гранул (рис. 1.17).

Утворення дисперсних часток в таких пристроях відбувається за рахунок руйнування струменів, що формуються в перфораціях оболонки.

Для оцінки розміру дисперсних часток, що утворюються при роботі перфорованих оболонок автор [32] пропонує використовувати залежності, отримані для витікання рідини з отворів та сопел, що обертаються, а саме формулу Ластовцева [61]

$$d_k = 81 \frac{\delta^{0,46} \sigma^{0,46} \mu^{0,08}}{w_0 \rho^{0,5}}, \quad (1.2)$$

де δ – товщина плівки рідини, м;

w_0 – колова швидкість диску, м/с.

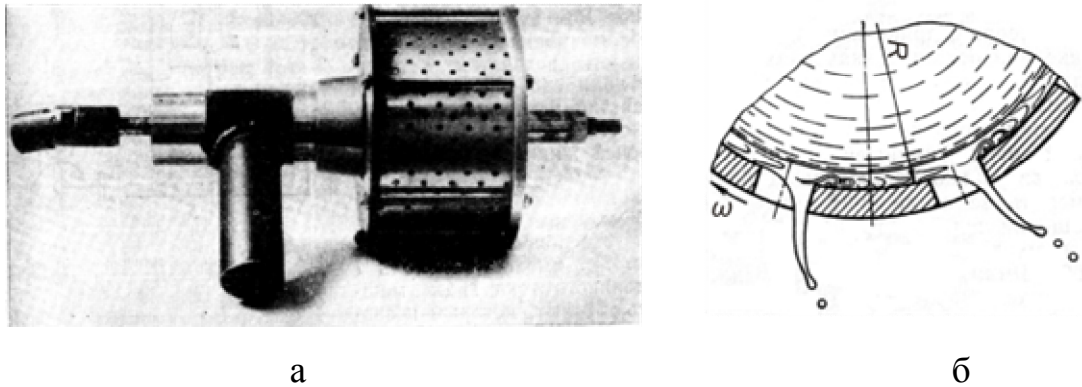


Рис. 1.17. Перфорована обертова оболонка: а – фото оболонки з ротором; б – схема диспергування рідини

Таким чином, використання диспергуючих пристроїв відцентрового типу з регулярною структурою елементів, що їх утворюють, дозволяє отримати дисперсний потік, що за характеристиками максимально наближається до монодисперсного.

1.4. Закономірності масообміну в дисперсних системах

Закономірності масообміну в дисперсних системах вивчалися багатьма дослідниками. Залежність швидкості переносу компоненту від фізико-хімічних властивостей фаз та режимних параметрів у більшості авторів представлені у вигляді критеріальних рівнянь. В загальному вигляді критеріальне рівняння масовіддачі від краплі, що рухається в газовому середовищі, багатьма дослідниками представляється у вигляді

$$Nu = A + B Re^n Pr^m. \quad (1.3)$$

В роботах [36, 62, 63, 69-71, 73, 74] приведено ряд критеріальних залежностей, які описують масовіддачу в газовій фазі для одиночних крапель в стадії польоту, основні з яких представлені нижче:

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (1.4)$$

$$Nu = 2 + 0,459 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (1.5)$$

$$Nu = 0,74 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (1.6)$$

$$Nu = 2 + 0,69 Re^{0,5} Pr^{0,33}. \quad (1.7)$$

В роботі [28] проведений аналіз залежностей, отриманий різними авторами на підставі експериментів в різних умовах – з одинокими краплями, ансамблем крапель та розпилюючими апаратами. Приведені рівняння мають достатньо схожий вигляд. В результаті рекомендується для систем з опором в газовій фазі використовувати рівняння Дрейка [64] (залежність (1.5)) та рівняння Фреслінга

$$Nu = 2 + 0,552 Re^{0,5} Pr^{0,33}. \quad (1.8)$$

Проведений Броунштейном [25] аналіз експериментальних робіт по масовіддачі в суцільному середовищі з твердою сферою, показав, що існуючі залежності можна представити у вигляді

$$Nu = 2 + a Re^{0,5} Pr^{0,33}. \quad (1.9)$$

За даними робіт, проаналізованих в [25], величина a дорівнює 0,55, 0,95 та 0,72. При співставленні цих даних з власними результатами Броунштейн говорить про найкращу відповідність при $a = 0,72$.

Шервуд [21] рекомендує для області $20 < Re < 2000$ брати в рівнянні (1.9) значення $a = 0,63$ якщо суцільне середовище – газ, та $a = 0,76$ – якщо рідина.

Як видно з приведених даних значна кількість залежностей, отриманих різними авторами, мають загальний вигляд (1.3). Одночасно з цим в ряді

робіт є інші форми рівнянь. Наприклад, Розеном [66] була запропонована залежність

$$Nu = 0,65 Re^{0,5} \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_2} \right)^{-0,5}. \quad (1.10)$$

Для масовіддачі з крапель рідини даних представлено значно менше. Автор [28] рекомендує використовувати рівняння Рамма [65] для розпилюючих апаратів

$$Nu = 1,13 (Pe_p)^{0,5} \text{ при } Fo \leq 0,0293, \quad (1.11)$$

$$Nu = 6,6 \text{ при } Fo > 0,0293. \quad (1.12)$$

де $Fo = D_p \tau / d_k^2$ – критерій Фурьє;

τ – час перебування краплі в зоні контакту, с.

Експериментальні дані по абсорбції O_2 з повітря краплями води, отримані Маймековим з співробітниками [67, 68] узагальнені у вигляді

$$Nu = 0,38 Re^{0,91}. \quad (1.13)$$

Наведені вище залежності узагальнюють результати, отримані при масовіддачі в одиноких краплях або розпиленому потоці в умовах гравітаційного поля. Характер взаємодії фаз в полі відцентрових сил має певні відмінності, крім того на масообмінні показники впливають характеристики контактних пристроїв, які також визначають особливості контакту фаз.

При дослідженні масообмінних характеристик ВМА з перфорованим ротором в [4] на трьох типах контактних пристроїв (рис. 1.11) для

масовіддачі в газовій фазі результати узагальнені у вигляді наступних залежностей:

- для контактної пристрою з гофрованих дисків (рис. 1.11а)

$$\frac{h_G}{d_3} = 1,151 \text{Re}_G^{0,31} \text{Re}_L^{-0,3} Fr^{-0,10} Sc_G^{0,66}; \quad (1.14)$$

- для контактної пристрою з радіальних блоків (рис. 1.11б)

$$\frac{h_G}{d_3} = 1,522 \text{Re}_G^{0,39} \text{Re}_L^{-0,3} Fr^{-0,11} Sc_G^{0,66}; \quad (1.15)$$

- для контактної пристрою з перфорованих пластин (рис. 1.11в)

$$\frac{h_G}{d_3} = 0,348 \text{Re}_G^{0,55} \text{Re}_L^{-0,3} Fr^{-0,23} Sc_G^{0,66}. \quad (1.16)$$

Для масовіддачі в рідині залежності мають вигляд:

- для контактної пристрою з гофрованих дисків (рис. 1.11а)

$$\frac{h_L}{d_3} = 4,399 \cdot 10^{-3} \text{Re}_G^{-0,49} Fr^{-0,26} Sc_L^{0,5}; \quad (1.17)$$

- для контактної пристрою з радіальних блоків (рис. 1.11б)

$$\frac{h_L}{d_3} = 0,181 \cdot 10^{-3} \text{Re}_G^{-0,59} Fr^{-0,42} Sc_L^{0,5}; \quad (1.18)$$

- для контактної пристрою з перфорованих пластин (рис. 1.11в)

$$\frac{h_L}{d_3} = 2,183 \cdot 10^{-3} \text{Re}_G^{-0,49} Fr^{-0,21} Sc_L^{0,5}. \quad (1.19)$$

Високі масообмінні показники в дисперсних системах досягаються завдяки розвинутій поверхні контакту фаз. При зменшенні розміру краплі

загальна поверхня контакту зростає, але при цьому зменшується інтенсивність внутрішньокраплинних циркуляцій, яка визначає внутрішню масовіддачу. Тобто існує критичний розмір, при якому масовіддача в краплі буде мінімальною. Цей критичний діаметр Пажі [28] пропонує визначати за рівнянням Пліта:

$$\frac{\sigma}{d_{кр} \gamma_p} = 1,25 \cdot 10^{-3} \left(\frac{w_{відн} \mu_2}{\sigma} \right)^{0,78} \left(\frac{\sigma^3 \rho_2^2}{\mu_2 \gamma_p} \right)^{0,42}, \quad (1.20)$$

де γ_p – питома вага рідини, Н/м³;

$w_{відн}$ – відносна швидкість руху фаз, м/с.

Дослідження масообмінних процесів показують, що спостерігається збільшення інтенсивності масопереносу при нестационарних гідродинамічних режимах руху фаз.

В роботі [25] автори наводять дані щодо зростання інтенсивності масопереносу при утворенні і відриві крапель та їх коалесценції відомі як кінцеві ефекти. Це пояснюється активним оновленням поверхні фазового контакту та перемішуванням рідини в середині краплі під час її росту та відриву.

Водночас з цим авторами [25] на підставі аналізу ряду робіт отримані залежності часу релаксації τ протягом якого біля краплі встановлюється стаціонарний режим концентрацій в суцільній фазі. Для краплі, що рухається, час релаксації дифузійного процесу залежить від критерію Пекле. На рис.1.18 представлені залежності $Sh(\tau)/Sh$ від τ при різних значеннях Pe для стокосового режиму обтікання твердої сфери ($Re < 1$).

Значення $Sh(\tau)$ визначається як

$$Sh(\tau) = 2 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \right). \quad (1.21)$$

Час релаксації при великих Pe оцінюють величиною $\tau \sim \frac{1}{Pe^{2/3}}$.

З приведених даних видно, що інтенсивність масопереносу в нестационарному режимі може до 5 разів перевищувати значення після релаксації. Відповідно проведення процесів масообміну в нестационарних режимах дозволяє значно підвищити їх інтенсивність. В свою чергу для отримання активного режиму масопереносу в нестационарних умовах в апараті необхідно створення відповідних гідродинамічних умов.

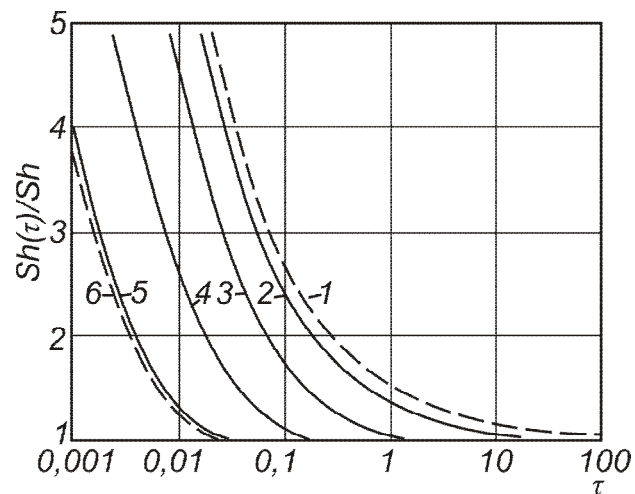


Рис. 1.18. Залежність $Sh(\tau)/Sh$ від τ при $Re < 1$ для значень Pe : 1 – $Pe = 0$; 2 – $Pe = 1$; 3 – $Pe = 10$; 4 – $Pe = 100$; 5, 6 – $Pe = 1000$ (за даними різних авторів)

1.5. Висновки, постановка завдань дослідження

Проведений аналіз літературних даних по інтенсифікації процесів масообміну в газорідних системах з застосуванням поля відцентрових сил та існуючих конструкцій відцентрових масообмінних апаратів показав, що в цьому напрямку проведена достатня кількість робіт.

Серед розроблених конструкції відцентрових апаратів в газорідних системах перспективними є роботи по дослідженню характеристик ВМА з перфорованим ротором, відомого також як HiGee [2, 3], що працює в режимі

протитечійної взаємодії фаз. Для цього апарата розроблені та досліджені різні типи контактних пристроїв. При цьому в дослідженнях виділяється два основні підходи. Перший полягає в створенні максимальної площі плівки рідини за рахунок використання в насадках матеріалів з високою питомою поверхнею. В другому високорозвинута поверхня контакту фаз досягається за рахунок диспергування рідини в об'ємі апарата, що забезпечується відповідними конструкціями контактних елементів в середині ротора.

Отримані при дослідженні контактних пристроїв залежності по масовіддачі в фазах мають в більшості експериментальну природу. Вони відрізняються між собою відмінностями конструкцій апаратів та контактних пристроїв і відповідно особливостями взаємодії фаз в зоні контакту.

Водночас з цим перспективним шляхом інтенсифікації процесу масообміну є робота відцентрових апаратів в нестационарних гідродинамічних режимах з багатократним використанням ефектів зростання масопереносу в період утворення крапель (кінцевих ефектів). На сьогоднішній день потенціал цього напрямку не вичерпаний і залишаються можливості для подальших удосконалень процесу.

Практична реалізація цього підходу полягає в організації режиму взаємодії фаз з багатостадійним утворенням та руйнуванням дисперсного потоку в об'ємі апарата. Це дозволяє більш повно використати активне внутрішньокраплинне перемішування та оновлення поверхні контакту, які мають місце при утворенні та руйнуванні дисперсної фази.

Таким чином, метою роботи є дослідження закономірностей гідродинаміки та масопереносу в відцентровому масообмінному апараті з контактним пристроєм у вигляді набору сітчастих кільцевих контактних елементів, установлених коаксійно з кроком один від одного, що забезпечує організацію взаємодії фаз у режимі багатостадійного диспергування рідини.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- отримання фізичної моделі взаємодії фаз в розробленому контактному пристрої;

- математичний опис гідродинамічних закономірностей взаємодії фаз у контактному пристрої ВМА;
- експериментальні дослідження гідродинаміки та масообміну в ВМА залежно від конструктивних параметрів контактної пристрою та режимних параметрів роботи апарата;
- перевірка й уточнення отриманих теоретичних залежностей експериментальним шляхом на модельних системах;
- створення інженерної методики розрахунку відцентрового масообмінного апарата та визначення основних вимог до ВМА під час його роботи;
- дослідно-промислова апробація та впровадження розробленого апарата в промисловість.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вибір та обґрунтування напрямку досліджень

Проведений огляд та аналіз існуючого стану організації процесів масопереносу в полі відцентрових сил показав, що на сьогоднішній день створено та досліджено достатньо велику кількість конструкцій відцентрових масообмінних апаратів та контактних пристроїв до них. В тому числі певну частку займають апарати, що працюють в системах рідина - газ (пара) з організацією взаємодії фаз в режимах диспергування рідини.

Серед конструкцій відцентрових апаратів нами для досліджень була обрана конструкція протитечійного відцентрового масообмінного апарата (рис. 2.1а, рис. 2.1б).

Конструктивно апарат складається з циліндричного корпусу 1, на якому розташовані патрубки для вводу та виводу фаз (4, 5, 6 та 7). В середині корпусу на встановлений обертовий вал 8 з закріпленим на ньому перфорованим ротором 2. В середині ротора встановлюється контактний пристрій 3.

Рідина подається в середину контактної пристрою і рухається до периферії ротора. Газова фаза надходить через тангенційно встановлений патрубок від периферії ротора та рухається протитоком рідині до центру контактної пристрою. Ущільнення валу та ротора запобігають проходженню газу повз контактний пристрій.

З метою підвищення інтенсивності масообмінних процесів в ВМА нами розроблена нова конструкція контактної пристрою [75], яка обрана в якості об'єкту досліджень. Контактний пристрій являє собою набір встановлених вісесиметрично кільцевих контактних елементів (рис. 2.1в). Елементи виготовлені з дрібночарункової металевої сітки та встановлені на певній відстані один від одного.

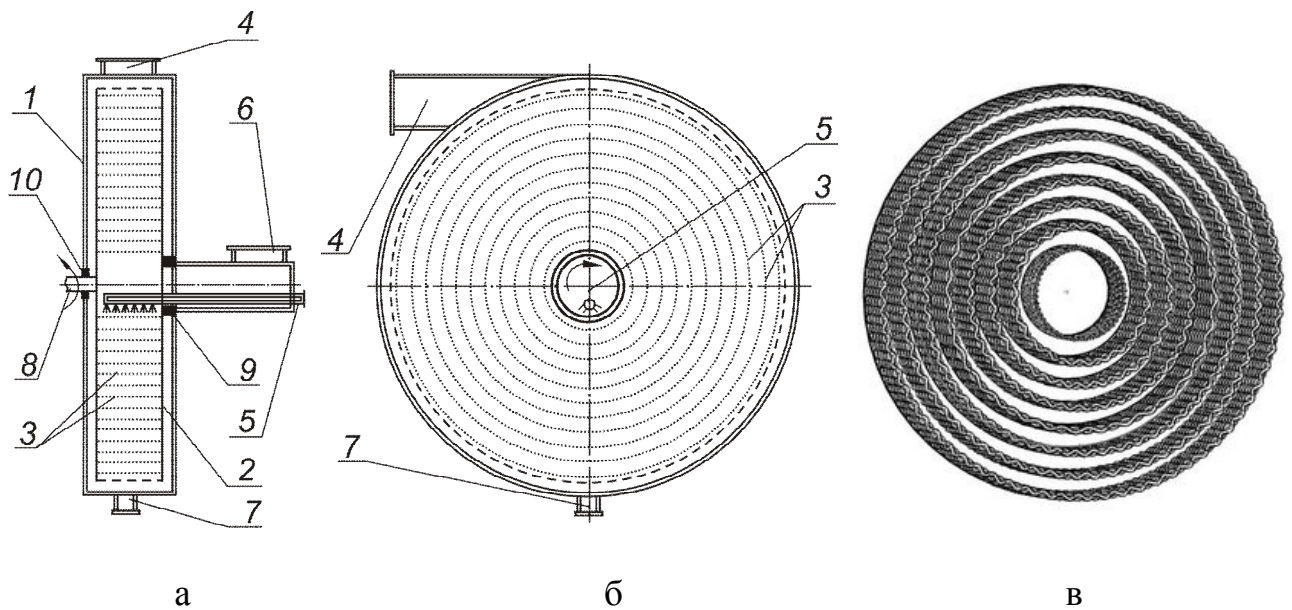


Рис. 2.1. Схема ВМА (а, б) та схема контактної пристрою (в): 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – контактний пристрій; 4, 5 – патрубки для подачі газу та рідини відповідно; 6, 7 – патрубки для виведення газу та рідини відповідно; 8 – вал; 9, 10 – ущільнення

Рідина подається по патрубку на внутрішню поверхню контактної пристрою. Внутрішній кільцевий елемент контактної пристрою виконує функцію формування дисперсної рідкої фази та її рівномірне розподілення по перерізу.

За рахунок сил тертя, що виникають між рідиною та контактними елементами, а також капілярних сил, рідина захоплюється в обертний рух. Під дією відцентрової сили відбувається диспергування рідини, диспергований потік рухається в радіальному напрямку до периферії ротора.

В процесі руху на кожному з кільцевих контактних елементів відбувається контакт крапель з поверхнею елемента (сіткою), руйнування крапель та перемішування рідини. Під дією відцентрової сили формується оновлена дисперсна фаза та відбувається подальший рух краплинної рідини до наступного контактної елемента.

Таким чином, під час проходження рідини через контактний пристрій існують характерні гідродинамічні стадії: утворення дисперсного потоку

рідини на контактному елементі, рух краплинного потоку під дією відцентрової сили в вільному просторі між елементами та ударна взаємодія крапель, що рухаються, з сітчастою поверхнею наступного контактного елемента.

Така схема організації гідродинамічної взаємодії рідини та газу дозволяє інтенсифікувати масоперенос між фазами за рахунок створення розвинутої поверхні контакту в дисперсному потоці, постійному оновленні поверхні контакту в об'ємі ротора та чисельних кінцевих ефектів, наявних при багатократному утворенні крапель при одночасній протитечійній взаємодії з газовою фазою.

2.2. Загальна методика проведення досліджень

Метою роботи було дослідження гідродинамічних та масообмінних характеристик ВМА з контактним пристроєм запропонованої нами конструкції і створення інженерної методики розрахунку таких апаратів.

Для досягнення поставленої мети були застосовані теоретичні та експериментальні методи дослідження. В рамках теоретичних досліджень вивчалася фізична картина поведінки фаз і виконувалося математичне моделювання гідродинаміки фаз в середині контактної пристрою.

Проведення експериментальних досліджень мало на меті підтвердження адекватності теоретичних положень (фізичної та математичної моделі), отримання необхідних емпіричних даних та коефіцієнтів, що пов'язують теоретично побудовані моделі з результатами експерименту, а також отримання експериментальним шляхом залежностей гідродинамічних та масообмінних параметрів роботи апарата, які мають багатofакторну природу і коректний теоретичний опис яких значно ускладнений.

2.3. Конструкція експериментального стенда

Експериментальні дослідження гідродинамічних та масообмінних характеристик роботи контактної пристрою для відцентрового

масообмінного апарата проводилися на спеціально створеному лабораторному стенді (рис. 2.2)

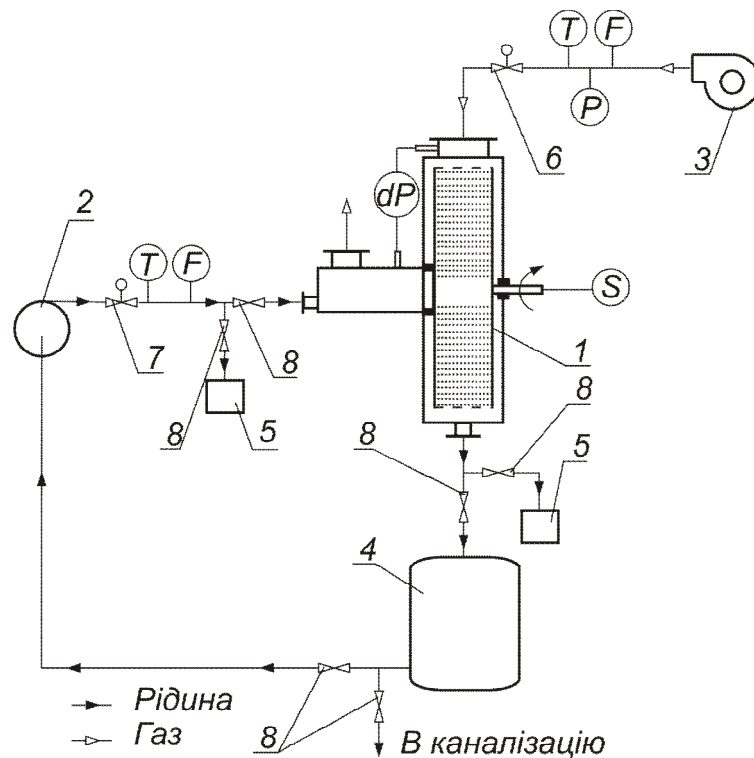


Рис 2.2. Схема експериментального стенда: 1 – відцентровий масообмінний апарат; 2 – насос; 3 – вентилятор; 4 – збірник; 5 – пробовідбірник; 6, 7 – засуви; 8 – кран

Основним елементом стенда є модель відцентрового масообмінного апарата з контактним пристроєм, що встановлений в середині обертового ротора, який закріплений вертикально на валу (рис.2.3). Ротор має розміри: внутрішній діаметр 0,04 м, зовнішній 0,2 м, ширина 0,03 мм. Вал ротора приводиться у обертання через пасову передачу від електродвигуна постійного струму.

Регулювання частоти обертання здійснюється шляхом зміни напруги, що подається на якір електродвигуна. Швидкість обертання ротора може змінюватися від 0 до 628 рад/с. На валу апарата встановлений датчик тахометра ППЕ-Д1 для виміру частоти обертання ротора, результати вимірювання виводяться на розташований окремо цифровий дисплей.

Рідина в апарат надходить з бака 4 за допомогою відцентрового насоса 2, повітря подається вісним вентилятором 3.

Для проведення досліджень виготовлялися контактні пристрої з коаксійних кільцевих елементів, виготовлених з дрібночарункової металеві сітки (рис.2.4).

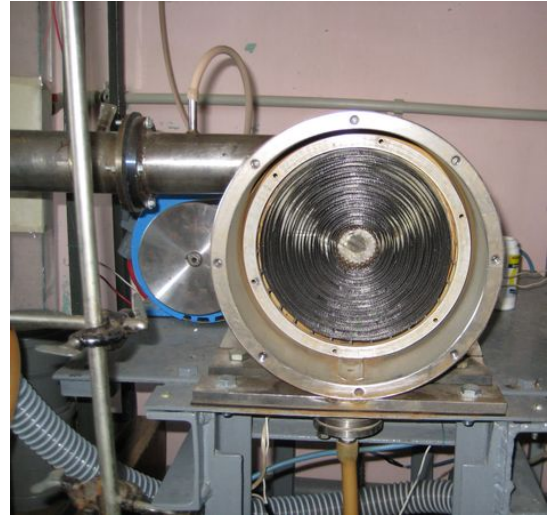
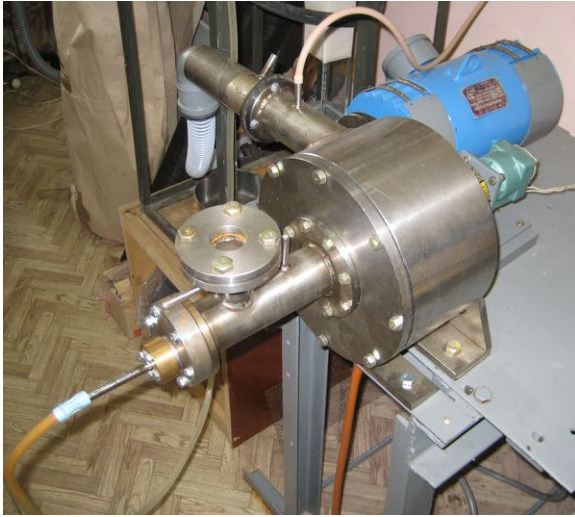


Рис. 2.3. Лабораторна установка ВМА



Рис. 2.4. Контактний пристрій ВМА

Внутрішнє кільце контактної пристрою виконувалося з сітки просічно-втяжного типу з геометричною конфігурацією, відмінною від інших контактних елементів. Таке рішення обумовлене наступним. Внутрішній кільцевий елемент виконує функцію диспергуючого пристрою, його задача

зруйнувати та подрібнити потік рідини, що надходить зі зрошувача. Одночасно він має мінімальний по відношенню до інших елементів радіус і відповідно в цьому перетині найменше значення відцентрової сили, що діє на рідину і забезпечує її рух в середині пристрою.

При цьому внутрішнє кільце контактної пристрою має найменший переріз і відповідно швидкість газу тут максимальна. Тобто на цьому елементі в першу чергу може наступити бризковинос та захлинання апарата. Для мінімізації цих негативних факторів та розширення меж роботи апарата перше кільце контактної пристрою виготовлене з просічно-витяжної сітки. Ця сітка внаслідок іншої технології виготовлення ніж плетена або ткани, має значно більші отвори (чарунку) та вільний перетин, дроти ромбовидного перерізу з шорсткою поверхнею, це зменшує ступінь утримання плівки рідини на поверхні та сприяє подрібненню рідинного потоку.

2.4. Визначення гідродинамічних характеристик апарата

Експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик склалися з візуальних спостережень поведінки рідкої фази в середині контактної пристрою, визначення дисперсних характеристик потоку рідини та дослідження гідравлічного опору апарата в залежності від режимних характеристик роботи та конструктивних особливостей контактної пристрою.

Дослідження гідродинамічних характеристик проводили на системі вода-повітря. Подача рідини до апарата здійснювалась з ємності 4 за допомогою насосу 2, витрата рідини контролювалась одним або декількома (до трьох) паралельно з'єднаних ротаметрів типу РМ-0,16-ЖУЗ, регулювання витрати здійснювалось засувом 7. Повітря подавалося вісним вентилятором 3. Витрата повітря контролювалась методом швидкісного напору (за допомогою трубки Піто-Прандля), регулювання витрати здійснювали засувом 6. Також контролювалась температура рідини та газу на вході в

апарат, вимірювання проводилося рідинними термометрами ТЛ-4 з ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$.

2.4.1. Визначення перепаду тиску

Перепад тиску в апараті визначали за допомогою чашкового дифманометра з похилою трубкою типу ММН-2400(5)-1,0, який був з'єднаний з імпульсними трубками, вмонтованими в патрубки вводу та виводу газової фази апарата. Патрубки мають однаковий діаметр, місця встановлення імпульсних трубок розташовані на прямолінійних ділянках, на відстані не менше 4 діаметрів патрубка від входу (виходу) газового потоку.

Величина перепаду тиску визначалася на сухому та зрошуваному контактному пристрої при змінних режимних характеристиках: частоти обертання ротора, щільності зрошення, швидкості газу. Крім того, досліджувався вплив особливостей конструкції контактної пристрою на гідродинаміку газової фази, а саме відстань (крок) між кільцевими елементами.

Для цього була виготовлена серія контактних пристроїв з різним кроком між контактними елементами. Для більш коректного врахування впливу кроку на характеристики роботи і зменшення впливу вхідної та вихідної зон апарата, величина кроку варіювалася на ділянці, розташованій між радіусами $r_1=0,05$ м та $r_2=0,07$ м ($\Delta r=0,02$ м) в центральній зоні контактної пристрою. В межах цієї ділянки змінювали крок між кільцевими елементами шляхом зміни кількості елементів на цій відстані (рис. 2.5).

При дослідженні опору сухого контактної пристрою визначали опір безпосередньо центральної ділянки (зафарбована зона на рис. 2.5), на якій змінювали крок між елементами [76].

Повний перепад тиску в контактному пристрої є сумою складових

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ц}} + \Delta P_{\text{вх+вих}}, \quad (2.1)$$

де ΔP_y – перепад на центральній (досліджуваній) ділянці, Па;

$\Delta P_{вх+вих}$ – перепад тиску вхідної та вихідної частини контактної пристрою та відповідних зон апарата, Па.

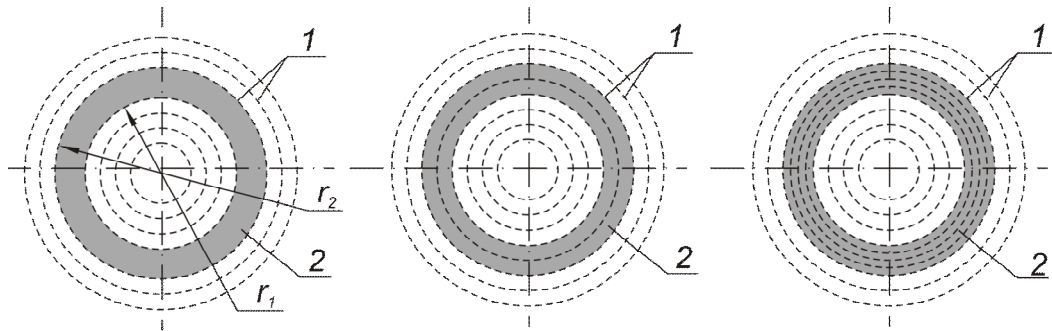


Рис. 2.5. Схема контактних пристроїв ВМА: 1 – контактні елементи; 2 – досліджувана ділянка зі змінним кроком між елементами

Величина $\Delta P_{вх+вих}$ є постійною для всіх контактних пристроїв серії в однакових режимах роботи.

Величина ΔP_y , включає в себе опір безпосередньо матеріалу, що заповнює цю ділянку (ΔP_0), та опір на подолання протидіючої відцентрової сили на цій відстані (ΔP_ω), тобто

$$\Delta P_y = \Delta P_0 + \Delta P_\omega. \quad (2.2)$$

Перепад тиску елементарної ділянки сухого необертового контактної пристрою ВМА, який складається з пакету регулярної насадки при однофазовому русі газу виражається рівнянням

$$dP_0 = \xi_0 \frac{dr}{d_e} \frac{\rho_z w_z^2(r)}{2}, \quad (2.3)$$

де ξ_0 – коефіцієнт гідравлічного опору;

d_e – еквівалентний діаметр насадки, м;

$w_z(r)$ – швидкість газу на радіусі r контактної пристрою, м/с.

$$w_z(r) = \frac{G}{F_0(r)} = \frac{G}{F_0(r_0)} \cdot \frac{r_0}{r}, \quad (2.4)$$

де $F_0(r)$ – вільний переріз сухої насадки на радіусі контактної пристрою r , м².

Вираз (2.3) з урахуванням (2.4) запишеться як

$$dP_0 = \xi_0 \frac{dr}{d_e} \cdot \frac{\rho_z}{2} \cdot \left(\frac{G}{F_0(r_0)} \cdot \frac{r_0}{r} \right)^2 = \xi_0 \frac{r_0^2}{d_e} \cdot \frac{\rho_z}{2} \cdot \left(\frac{G}{F_0(r_0)} \right)^2 \frac{dr}{r^2}. \quad (2.5)$$

Інтегруючи (2.5) в межах від внутрішнього r_0 до зовнішнього R радіусу отримаємо

$$\Delta P_0 = \xi_0 \frac{(R-r_0)}{d_e} \cdot \frac{\rho_z}{2} \cdot \left(\frac{G}{F_0(r_0)} \right)^2 \frac{r_0}{R}. \quad (2.6)$$

Складова перепаду тиску, що витрачається на подолання відцентрової сили інерції

$$dP_\omega = \frac{dV \cdot \rho_z \cdot \omega^2 r}{F} = \frac{F \cdot dr \cdot \rho_z \cdot \omega^2 r}{F} \rho_z \cdot \omega^2 r \cdot dr, \quad (2.7)$$

$$dP_\omega = \rho_z \cdot \omega^2 r \cdot dr. \quad (2.8)$$

Інтегруючи (2.8) в межах від r_0 до R отримаємо:

$$\Delta P_\omega = (R-r_0) \cdot \rho_z \omega^2 \frac{(R+r_0)}{2}. \quad (2.9)$$

Для визначення $\Delta P_{вх+вих}$ був виготовлений додатковий контактний пристрій, в якому досліджувана частина повністю заповнювалася пористим полімерним матеріалом. Був окремо визначений коефіцієнт гідравлічного опору цього матеріалу. Визначення проводили в аеродинамічній трубці, заповненій шаром такого матеріалу в залежності від швидкості газу.

Величину ΔP_{ψ} визначали за залежністю (2.2) для досліджуваної ділянки контактної пристрою від r_0 до r , заповненою пористим матеріалом. Значення $\Delta P_{вх+вих}$ розраховували за залежністю (2.1) як $\Delta P_{вх+вих} = \Delta P - \Delta P_{\psi}$.

Однак слід відмітити, що описаний вище підхід можливо застосовувати для дослідження величини ΔP тільки незрошеного апарата. Для досліджень в умовах зрошення використовувати описаний метод значно складніше. Це пов'язано з практичною складністю відтворення в умовах аеродинамічної труби гідродинаміки рідини в середині пористого матеріалу, яка б повністю відповідала гідродинамічній картині в середині контактної пристрою в умовах дії відцентрового поля.

Тому при дослідженні перепаду тиску зрошеного контактної пристрою проводили порівняння повної величини перепаду, виходячи з того, що ΔP вхідної і вихідної зони апарата в однакових режимах є величиною сталою і відповідно всі зміни перепаду тиску викликані змінами в досліджуваній області.

Для досліджень обрані такі кроки між кільцевими елементами: 0 (елементи встановлені щільним пакетом один до одного без зазору); $1,5 \cdot 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-2}$ та $2 \cdot 10^{-2}$ м.

2.4.2. Дослідження гідродинаміки рідини

В процесі досліджень гідродинаміки рідкої фази проводили вивчення дисперсних характеристик потоку рідини в середині контактної пристрою. При цьому досліджували режими диспергування рідини в контактному пристрої при змінних режимних та конструктивних характеристиках.

Дослідження проводили на контактних пристроях, виготовлених з різних типів сітки при змінній швидкості обертання ротора.

Для цього використовували методи візуального спостереження в стробоскопічному освітленні руху рідини в контактному пристрої. Визначення дисперсних характеристик потоку рідкої фази проводили за допомогою швидкісної фотозйомки поведінки рідини з швидкістю експозиції від 1/30 до 1/60 с, виконуючи серію фотографій.

Для спостережень та фотографування використовували прозору кришку ротора (з оргскла), частина досліджень була проведена при відкритому роторі. Через особливість конструкції апарата організація експериментів в двохфазній протитечійній системі при збереженні можливості візуального спостереження та фотографування є достатньо складною задачею, тому дослідження гідродинаміки рідини проводилися при відсутності руху газу.

Оброблення фотографій проводилося за допомогою ЕОМ, при цьому визначалися розміри та кількість зафіксованих крапель.

Осереднення та обробку дисперсних характеристик краплинного потоку проводили за допомогою відомих підходів [27-29], через визначення модального та об'ємно-поверхневого середнього діаметрів.

Модальний діаметр (d_{mod}) при нормальному або близькому до нормального розподілу дисперсності показує розмір крапель, кількість яких найбільша в потоці, та визначається

$$d_{mod} = \frac{\sum_{i=1}^m (d_i n_i)}{\sum_{i=1}^m (n_i)}; \quad (2.10)$$

де d_i - діаметр краплі, м;

n_i - кількість крапель діаметром d_i , шт.

Об'ємно-поверхневий середній діаметр (діаметр Заутера) d_{32} визначається за залежністю

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^m (d_i^3 n_i)}{\sum_{i=1}^m (d_i^2 n_i)}. \quad (2.11)$$

Діаметр d_{32} фактично визначає питому кількість рідини, що утворює одиницю поверхні. Визначення діаметру Заутера є показовим при оцінці та моделюванні процесів масопереносу.

2.5. Методика дослідження масообмінних характеристик ВМА

В основу дослідження масообмінних характеристик покладене допущення про адитивність фазових опорів [21, 78]

$$\frac{1}{n_{oy}} = \frac{1}{n_y} + \frac{1}{n_x A}; \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{n_{ox}} = \frac{1}{n_x} + \frac{A}{n_y}; \quad (2.13)$$

де n_{oy} , n_{ox} – загальне число одиниць переносу, віднесене до концентрацій газової та рідкої фази відповідно;

n_y , n_x – число одиниць переносу в газовій та рідкій фазі відповідно;

$A = \frac{L}{mG}$ – фактор процесу масопередачі.

В рівнянні (2.12) та (2.13) кожна складова характеризує опір масопереносу в одній із фаз. Для погано розчинних газів величина m має великі значення і відповідно складова $\frac{1}{n_x A}$ в залежності (2.4) значно перебільшує $\frac{1}{n_y}$, тобто $n_{oy} \approx n_x A$, аналогічно для (2.5) при великих m

значення $\frac{A}{n_y}$ зменшується і $n_{ox} \approx n_x$. Якщо газ добре розчинний, то величина

m є незначною, по аналогії маємо: $n_{oy} \approx n_y$ та $n_{ox} \approx \frac{n_y}{A}$.

Для вивчення масообмінних характеристик досліджуваного контактного пристрою був обраний процес десорбції. Для дослідження характеристик масовіддачі в обох фазах використовувались діоксид вуглецю та аміак при десорбції їх з водного розчину в повітря. Вибір таких компонентів пояснюється зосередженням опору масопереносу в одній з фаз для кожної речовини (газ для аміаку та рідина для діоксиду вуглецю), що дозволяє дослідити закономірності масовіддачі в кожній з фаз та отримати повну характеристику масопереносу в контактному пристрої.

Для кількісної оцінки масообмінних характеристик використовували величину об'ємного коефіцієнту масовіддачі, який визначали за загальноприйнятими підходами [23, 78].

Аналіз концентрацій аміаку та діоксиду вуглецю проводили в рідкій фазі на вході та виході з апарата методами хімічного аналізу [79-82].

2.6. Оцінка похибки методики досліджень і похибок вимірів

Визначення похибки вимірів проводилося по загально прийнятих рекомендаціях [83, 84]. Для визначення оптимальної кількості експериментів і підвищення їхньої точності були використані методи математичної статистики [84, 85]. Всі помилки, що виникають в процесі проведення експериментальних досліджень, є сумою випадкових та систематичних помилок. Для уникнення систематичної помилки всі засоби вимірювання були відкалібровані по зразкових приладах в умовах проведення експериментів. Похибка вимірів при цьому визначалася класом точності засобів виміру.

При проведенні повторних вимірювань однієї і тієї ж величини, які проведені в однакових умовах, вплив випадкових помилок (після

виключення систематичних) можна оцінити з певною вірогідністю [86]. В даній роботі при обробці результатів ряду повторних вимірювань, що містять випадкові помилки, знаходили середнє значення, яке є кінцевим результатом вимірювань, виходячи з залежності

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (2.14)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – результати повторних вимірювань;

n – число вимірів.

В усіх випадках для оцінки випадкової помилки визначали дисперсію для серії паралельних дослідів [87]

$$S_i = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right). \quad (2.15)$$

Найбільшу вірогідну помилку окремого виміру визначали за правилом трьох сигм [83, 84]

$$\Delta = 3\sigma, \quad (2.16)$$

де $\sigma = \sqrt{S}$ – середньоквадратичне відхилення.

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення ε визначали по залежності [85] для довірчого інтервалу $P=0,95$

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.17)$$

де t_p – критерій Стьюдента.

Середньоквадратичну похибку непрямих вимірів визначали по залежності [83]

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.18)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

В процесі досліджень при визначенні ряду величини необхідно користуватись одночасно декількома засобами та методиками вимірювань і відповідно враховувати загальну похибку таких досліджень. Для урахування загальної похибки використовували правило «сумації похибок» [83–85]. Якщо результат є функцією добутків або відношень декількох величин, то квадрат відносної похибки результату дорівнює сумі квадратів відносних похибок окремих вимірювань. Таким чином

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2, \quad (2.19)$$

де $\delta_i = \frac{\Delta}{N_K - N_H} \cdot 100\%$ – приведена допустима похибка приладу;

Δ – абсолютна похибка;

$N_K - N_H$ – діапазон показань приладу;

δ – похибка результату вимірювань.

Для оцінки похибки досліджень використовували описаний підхід в кожному з вимірювань. Приведені допустимі похибки (або клас точності) для усіх приладів, що використані в процесі досліджень, наведені в таблиці 2.1. Результати оцінки показують, що використані в процесі досліджень вимірювальні прилади не вносять істотної похибки в визначення перепаду тиску та ефективності масопередачі.

Приведені допустимі похибки приладів

№	Вимірювана величина	Прилад вимірювань	Допустима похибка (клас точності)
1	Перепад тиску	Мікроманометр з похилою трубкою ММН-240	Клас точності 1,0
2	Температура	Термометр лабораторний ТЛ-4	0,2°С
3	Витрата газу	Трубка Піто-Прандтля (використовувалася у комплекті з ММН-240)	3%
4	Витрата рідини	Ротамер РМ-0,16ЖУЗ Ротамер РМ-0,25ЖУЗ Ротамер РМ-1,6ЖУЗ	Клас точності 2,5
5	Частота обертання	Тахометр з виносним дисплеєм ППЕ-1Д	Клас точності 1,0
6	Концентрації CO ₂ та NH ₃ в водному розчині	Блок автоматичного титрування БАТ-120	Клас точності 1,0

2.7. Висновки до другого розділу

Обґрунтований вибір предмету досліджень – контактний пристрій для відцентрового масообмінного апарата, що конструктивно складається з пакету встановлених вісесиметрично кільцевих контактних елементів. Елементи виготовляються з металевої сітки і розташовані в пакеті на певній відстані один від одного.

Розроблена схема експериментального стенда та виготовлена лабораторна модель ВМА, а також серія контактних пристроїв для

проведення досліджень. Розроблені методики проведення експерименту та визначені методи для оцінки похибки вимірювань.

Основні результати розділу опубліковані в [76, 114, 115].

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВМА

3.1. Фізична модель взаємодії фаз

Відцентровий масообмінний апарат працює в режимі протитечійної взаємодії фаз. Рідина через зрошувач подається в середину контактної пристрою, на внутрішній кільцевий елемент, який виконує функцію формування дисперсної фази. Рідка фаза під дією відцентрової сили рухається до периферії ротора, на кожному кільцевому елементі відбувається утворення оновленого дисперсного потоку. Газова фаза надходить через тангенційно встановлений патрубок від периферії ротора і рухається до центру контактної пристрою (рис. 3.1).

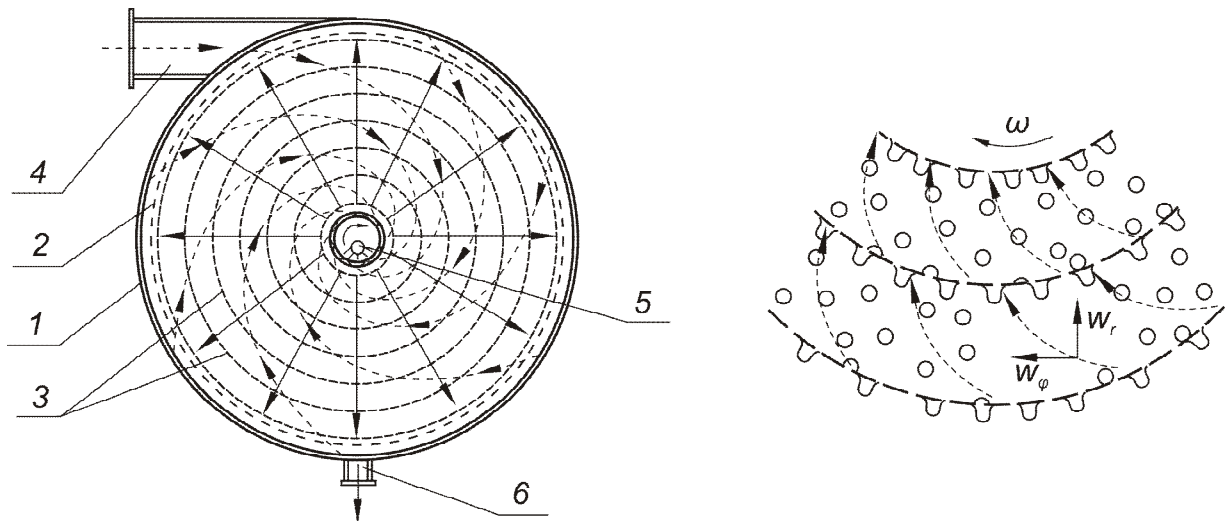


Рис. 3.1. Схема руху фаз в контактній пристрої ВМА: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – кільцеві контактні елементи; 4 – патрубок подачі газу; 5 – патрубок подачі рідини; 6 – патрубок відведення рідини. Суцільними лініями показаний напрямок руху рідини, пунктирними – напрямок руху газу

Формування дисперсної фази в робочому режимі відбувається при відриві крапель від прутків, що утворюють плетіння сітки. Розмір та форма краплі при відриві визначається балансом діючих на рідину сил.

У період утворення та відриву краплі наявні ефекти зростання інтенсивності тепломасообміну, відомі як кінцеві ефекти. Їх природа пов'язана з постійним оновленням поверхні краплі та активними внутрішньокраплинними циркуляціями рідини при диспергуванні.

Після відриву крапля існує в нестационарному гідродинамічному стані протягом певного часу (часу релаксації).

Диспергована рідина під дією відцентрової сили рухається в радіальному напрямку до контакту з наступним кільцевим елементом. На сітчастій поверхні елемента відбувається захоплення та руйнування крапель і утворення нової дисперсної фази.

В момент руйнування потоку та утворення оновленої дисперсної фази досягається інтенсифікація масовіддачі в краплі за рахунок кінцевих ефектів. Після відриву, в умовах релаксації, відбувається поступове зменшення інтенсивності масопереносу до досягнення стаціонарного стану. Багатократне використання кінцевих ефектів та нестационарних гідродинамічних режимів і лежить в основі конструкції запропонованого контактного пристрою.

Газ, який вводиться до апарата тангенційно, потрапляє через перфорацію в середину ротора. При цьому напрямок обертання ротора співпадає з напрямком введення газу. При вході газу в середину ротора газова фаза залучається в обертний рух і отримує колову складову швидкості, яка в граничному випадку дорівнює лінійній швидкості обертання зовнішнього радіусу ротора. Таким чином, формується спіралеподібна траєкторія руху газу в середині ротора.

Закручений потік газу в середині ротора рухається по спіралеподібній траєкторії в напрямку від периферії до центру. Сітки при проходженні крізь них газового потоку формують (генерують) впорядковану вихрову структуру, що відома як власна турбулентність сітки, і за своїм характером близька до

ізотропної [104, 105]. При цьому інтенсивність цієї турбулентності зростає на відстані від сітки до певного максимуму, далі вироджується і загасає. Відстань, що відповідає максимальній інтенсивності турбулентності, залежить від геометрії сітки (розміру прутка, чарунки та коефіцієнту вільного перерізу сітки).

Колова складова швидкості газу, згідно закону збереження моменту імпульсу, по мірі його руху по спіральній траєкторії зростає. Згідно закону нерозривності зростає і радіальна складова (через зменшення перерізу ротора від периферії до центру). В той же час від периферії до центру зменшується колова швидкість ротора через зменшення поточного радіусу. Таким чином відносна швидкість руху газу (відносно ротора) по ходу його руху зростає пропорційно впливу цих факторів.

В цілому гідродинаміка газу в роторі відцентрового масообмінного апарату має два рівні – в масштабі апарата (макрорівень) та в масштабі контактних елементів (мікрорівень), які відрізняються за своїм описом та впливом на гідродинамічні та масообмінні показники роботи ВМА.

3.2. Математична модель руху газу в контактному пристрої ВМА

Існуючи сьогодні моделі руху газу в відцентрових [4-6] та вихрових [33] протитечійних масообмінних апаратах достатньо точно враховують вплив діючих сил та розподіл швидкостей і тисків в апараті. Але їх застосування в нашій ситуації неприйнятне, в першому випадку через відмінну конструкцію контактної пристрою та викликаних цим особливостей протікання взаємодії фаз, в другому через наявність в ВМА обертового ротора.

Для отримання математичної моделі розглянемо течію газової фази в середині порожнього обертового ротора ВМА. Розглядаємо систему рівнянь Нав'є-Стокса сумісно з рівнянням нерозривності потоку в циліндричній системі координат з полярними координатами r , φ та аплікатою z .

Система рівнянь має вигляд [88, 102]

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{H} w_r - \frac{w_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\Delta w_r - \frac{w_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} \right) \\ \text{H} w_\varphi + \frac{w_r w_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \nu \left(\Delta w_\varphi - \frac{w_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial w_r}{\partial \varphi} \right) \\ \text{H} w_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta w_z \\ \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{w_r}{r} = 0 \end{array} \right. , \quad (3.1)$$

де диференційні оператори H та Δ визначаються за формулами:

$$\text{H} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + w_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + w_z \frac{\partial}{\partial z} = 0, \quad (3.2)$$

$$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (3.3)$$

Приймаємо наступні припущення:

- процес проходить в стаціонарному режимі;
- течія газу в контактному пристрої відбувається в двомірній площині, (відсутність руху вздовж вісі z);
- рух потоку є вісесиметричним.

Тобто: $\frac{\partial}{\partial \tau} = 0$; $\frac{\partial}{\partial z} = 0$; $w_z = 0$; $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$.

Система рівнянь (3.1) з урахуванням припущень запишеться у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} - \frac{w_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \\ w_r \frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + \frac{w_r w_\varphi}{r} = \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \right) \\ \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} = 0. \end{array} \right. \quad (3.4)$$

З рівняння нерозривності при граничних умовах $r = R$, $w_r = w_R$ знаходимо радіальну складову швидкості

$$w_r = w_R \frac{R}{r}. \quad (3.5)$$

Колова складова визначається вирішенням другого рівняння системи (3.4) відносно w_φ . При цьому необхідно знати розподіл по радіусу величини коефіцієнта турбулентної в'язкості ν .

В [33] для рішення подібної системи рівнянь показана можливість прийняття величини ν постійною по радіусу, результати рішення в такому випадку співпадають з експериментальними даними з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Друге рівняння системи (3.4) з урахуванням припущення $\nu(r) = const$ та залежності (3.5) має вигляд

$$\frac{d^2 w_\varphi}{dr^2} + (1 - K) \frac{dw_\varphi}{dr} r - (1 + K) w_\varphi = 0, \quad (3.6)$$

де $K = \frac{w_R R}{\nu}$ - безрозмірний коефіцієнт.

Рішення рівняння (3.6) має вигляд

$$w_\varphi = \frac{C_1}{r} + C_2 r^{K+1}. \quad (3.7)$$

Для визначення констант інтегрування у рівнянні (3.7) приймаємо припущення, що при вході в ротор газова фаза повністю захоплюється в обертний рух з кутовою швидкістю, що дорівнює швидкості обертання ротора.

При граничних умовах $r = R$, $w_{\varphi R} = \omega R$, $\frac{dw_\varphi}{dr} = \omega$ отримаємо рівняння (3.7) у вигляді

$$w_{\varphi} = \frac{w_{\varphi R}}{K + 2} \left(\frac{R}{r} K + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^{K+1} \right). \quad (3.8)$$

Аналіз складових рівняння (3.8) для робочого діапазону в'язкості газу ВМА (в діапазоні $\nu = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ м²/с) показує, що складова $2 \frac{w_{\varphi R}}{K + 2} \left(\frac{r}{R} \right)^{K+1}$ надто мала і практично не впливає на результат розрахунку. Враховуючи, що порядок $K = 10^4$, приймаємо $\frac{K}{K + 2} \approx 1$. При цьому рівняння (3.8) за формою наближається до закону збереження моменту імпульсу

$$w_{\varphi r} = w_{\varphi R} \frac{R}{r}. \quad (3.9)$$

Співставлення результатів розрахунків за (3.8) та (3.9) показує, що розбіжність результатів в робочому діапазоні ВМА не перебільшує 1%. Тобто для практичних розрахунків колової складової швидкості w_{φ} можна з достатньою точністю користуватися рівнянням (3.9).

Підставляючи (3.9) до першого рівняння системи (3.4) отримаємо

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{(w_R^2 + w_{\varphi R}^2) R^2}{r^3}. \quad (3.10)$$

Після інтегрування (3.10) маємо

$$P(r) = C_1 - \frac{1}{2} \frac{k}{r^2}. \quad (3.11)$$

де $k = \rho (w_R^2 R^2 + w_{\varphi R}^2 R^2)$.

Константу C_1 знаходимо при граничних умовах $r = r_0$, $P = P_0$

$$C_1 = P_0 + \frac{1}{2} \frac{k}{r_0^2}. \quad (3.12)$$

Перепад тиску в порожньому роторі є різниця тисків на зовнішньому (R) та внутрішньому (r_0) радіусах :

$$\Delta P = P(R) - P(r_0) = \frac{1}{2} k \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2} \right). \quad (3.13)$$

Або

$$\Delta P = \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) \frac{\rho_z}{2} (w_R^2 + w_{\varphi_R}^2). \quad (3.14)$$

Складова w_R визначається за рівнянням нерозривності (3.5), а величина колової швидкості w_φ визначається за залежністю (3.9).

Аналізуючи рівняння (3.14), можна зазначити, що сума квадратів складових швидкості є квадрат повної швидкості газу $w^2 = w_R^2 + w_{\varphi_R}^2$, а

величина $\left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) = \frac{2\Delta P}{\rho w^2}$ за фізичним змістом являє собою коефіцієнт

гідравлічного опору ξ . Отриманий коефіцієнт за формою аналогічний до коефіцієнту гідравлічного опору для конфузора, відомий як формула Карно-

Борда [89]: $\xi_{\text{конф}} = \lambda \left(\frac{d_{\text{вх}}^4}{d_{\text{вих}}^4} - 1 \right)$. У випадку конфузора маємо відношення

квадратів площ вхідного та вихідного перерізу $d_{\text{вх}}^4 / d_{\text{вих}}^4 = S_{\text{вх}}^2 / S_{\text{вих}}^2$. В нашому

випадку, враховуючи геометрію контактної пристрою, ми також маємо

відношення квадратів площ, а саме $S_{\text{вх}}^2 / S_{\text{вих}}^2 = (2\pi R h)^2 / (2\pi r_0 h)^2 = R^2 / r_0^2$. Але

залежність (3.14) отримана з рядом наближень і припущень, приведених по ходу рішення системи Нав'є-Стокса. Для урахування впливу цих наближень

на величину ΔP_i введемо в (3.14) коефіцієнт λ , який потребує в подальшому експериментального визначення. Відповідно залежність (3.14) запишеться

$$\Delta P = \lambda \xi \frac{\rho_z}{2} (w_R^2 + w_{\varphi_R}^2). \quad (3.15)$$

Залежність (3.14) включає фактично дві складові гідравлічного опору, які пов'язані зі складовими швидкості газу w_{φ_R} та w_R . Рівняння (3.14) може бути представлене у вигляді

$$\Delta P = \lambda \xi \frac{\rho_z w_R^2}{2} + \lambda \xi \frac{\rho_z w_{\varphi_R}^2}{2}. \quad (3.16)$$

Перша складова (3.16) характеризує гідравлічний опір нерухомого контактної пристрою

$$\Delta P_0 = \lambda \xi \frac{\rho_z w_R^2}{2}. \quad (3.17)$$

Складова $\lambda \xi \frac{\rho_z w_{\varphi_R}^2}{2}$ характеризує відцентрову складову гідравлічного опору, тобто витрати енергії на подолання відцентрової сили, що діє на газову фазу при обертанні ротора

$$\Delta P_{\text{вц}} = \lambda \xi \frac{\rho_z w_{\varphi_R}^2}{2}. \quad (3.18)$$

Таким чином маємо:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{\text{вц}}. \quad (3.19)$$

Отримані рівняння (3.16) – (3.19) дозволяють розраховувати гідравлічний опір порожнього ротора ВМА (від R до r_0), або його ділянки обмеженої двома перерізами (від r_1 до r_2).

В апараті з встановленим контактним пристроєм в середині ротора є набір вісесиметричних кільцевих елементів, які розташовані на відстані один

від одного. Наявність контактних елементів є причиною додаткової (в порівнянні з порожнім ротором) втрати енергії газу на їх обтікання.

Для визначення гідравлічного опору апарата з контактним пристроєм представимо його як суму двох складових – опору контактних елементів та сумарного опору ділянок між елементами.

Сумарні втрати тиску газу при русі в просторі між кільцевими елементами є сума опорів кожної такої ділянки (рис. 3.2).

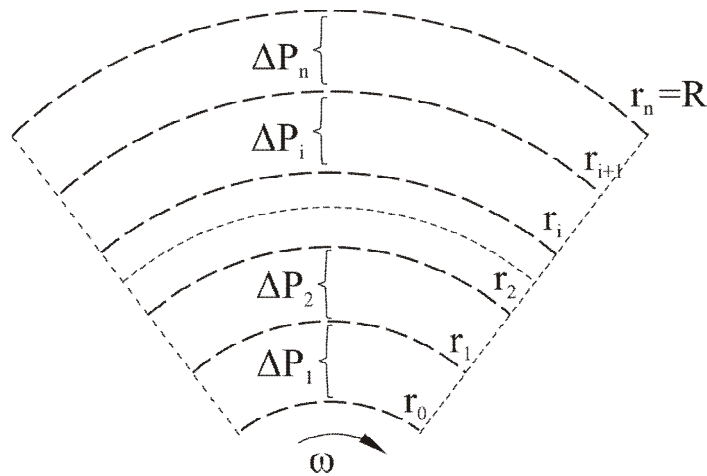


Рис. 3.2. Схема моделі для визначення гідравлічного опору контактного пристрою

Опір на відстані між i -м та $(i+1)$ -м елементами визначається аналогічно опору порожнього ротора за (3.14) – (3.16) в межах від r_i до r_{i+1}

$$\Delta P_i = P(r_{i+1}) - P(r_i) = \lambda \left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) \frac{\rho_z}{2} (w_{r_{i+1}}^2 + w_{\varphi_{i+1}}^2). \quad (3.20)$$

Гідравлічний опір металевої сітки при обтіканні газовим потоком по нормалі до її поверхні визначається відомою залежністю, наведеною, наприклад, в довіднику Ідельчика [101]

$$\Delta P_c = \xi_c \frac{\rho w^2}{2}. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору ξ_c для плетених металевих сіток з прутками круглого перетину знаходиться за залежністю [101]

$$\xi_c = k'_{\text{Re}} \cdot \xi_0, \quad (3.22)$$

$$\text{де } \xi_0 = k_0 \left(1 - \bar{f}\right) + \left(\frac{1}{\bar{f}} - 1\right)^2;$$

$\bar{f} = F_{\text{вільн}} / F_{\text{заг}}$ – коефіцієнт вільного перерізу сітки.

Величина k_0 згідно даних [101] лежить в межах 1 – 1,3 в залежності від стану сітки (окисленість, запиленість і т.д.). Одночасно з цим в роботі [104] показано, що експериментальні дані достатньо точно корелюють з розрахунком за (3.22) для металевих сіток (в їх робочому стані) при $k_0=1,3$.

Коефіцієнт k'_{Re} в залежності від числа Рейнольдса дорівнює [101]:

$$- k'_{\text{Re}} = \frac{22}{\text{Re}} + \xi_0 \text{ при } \text{Re} < 50;$$

- $k'_{\text{Re}} = 1 - 1,4$ при $50 < \text{Re} < 10^3$ (точне значення знаходиться за графічною залежністю в [101]);

$$- k'_{\text{Re}} = 1 \text{ при } \text{Re} > 10^3.$$

Коефіцієнт гідравлічного опору сітки ξ_c за залежністю (3.22) коректно застосовувати за умови руху газу по нормалі до поверхні сітки.

Рівняння (3.20) визначає гідравлічний опір порожнього ротора або ділянки контактної пристрою між кільцевими елементами. В випадку ділянки між елементами, за (3.20) можна визначити опір першої (від периферії) ділянки. Для розрахунку гідравлічного опору наступних ділянок необхідно задавання граничних умов, а саме колової швидкості w_φ , яка змінюється внаслідок обтікання газом перешкоди (сітки). Корегування w_φ при русі газу крізь сітку проводимо введенням в рівняння коефіцієнту k_φ .

Величина k_φ визначається у відносних швидкостях (відносно швидкості руху контактного елемента $w_{елем} = \omega r$)

$$k_\varphi = \frac{w'_\varphi - \omega r}{w_\varphi - \omega r}, \quad (3.23)$$

де w'_φ – колова складова швидкості до проходження крізь сітку, м/с;

w_φ – колова складова швидкості після проходження крізь сітку, м/с.

Коефіцієнт k_φ потребує визначення експериментальним шляхом.

При отриманні залежності для визначення гідравлічного опору (3.20) приймалося допущення щодо вирівнювання швидкостей обертання ротора та колової швидкості газової фази ($w_{\varphi R} = \omega R$) на вхідній ділянці ротора, тобто на зовнішньому радіусі R .

Практично зовнішня поверхня ротора може прискорювати рух газу в коловому напрямку (якщо колова швидкість газу менша за швидкість ротора), або гальмувати його (якщо швидкість газу відповідно більша), що впливає на величину w_φ . Для врахування впливу вхідної зони ротора на колову складову швидкості газу і відповідно гідравлічний опір введемо в рівняння (3.18) коефіцієнт k_{ex}

$$\Delta P_i = P(r_{i+1}) - P(r_i) = k_{ex} \lambda \left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) \frac{\rho_z}{2} (w_{r_{i+1}}^2 + w_{\varphi_{i+1}}^2). \quad (3.24)$$

Тут слід зазначити, що при $r_{i+1} = R$, необхідно враховувати вплив вхідної зони через k_{ex} , а величина $w_{\varphi R}$ приймається як $w_{\varphi R} = \omega R$. Для всіх наступних ділянок контактної пристрою (при $i = n-1$ та менше) вхідна зона

не здійснює впливу, тобто $k_{ex} = 1$, а колова складова швидкості визначається

$$\text{з (3.23) як } w_{\varphi_i} = \frac{w'_{\varphi_i} - \omega r_i (1 - k_{\varphi})}{k_{\varphi}}.$$

Величина w'_{φ_i} в свою чергу згідно (3.9) дорівнює $w'_{\varphi_i} = w_{\varphi_{i-1}} (r_{i-1} / r_i)$.

Коефіцієнт k_{ex} визначається конструктивними особливостями вхідної ділянки та потребує експериментального визначення.

Загальний гідравлічний опір сухого контактного пристрою є сумою опорів контактних елементів при їх радіальному обтіканні за залежністю (3.21) та сумою опорів ділянок між елементами ΔP_i , які визначаються за (3.24). Опір ділянок в свою чергу має дві складові – опір нерухомого апарата (ΔP_0) та опір, викликаний дією відцентрової сили (ΔP_{φ_i}). Тобто загальний гідравлічний опір сухого контактного пристрою запишеться

$$\Delta P_{сух} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_0 + \Delta P_{\varphi_i} + \Delta P_{c_i}). \quad (3.22)$$

Вплив рідини на гідродинаміку газу залежить від ряду факторів (навантаження по фазам, дисперсність рідкої фази, відносна швидкість руху крапель та газу, діюча відцентрова сила, крок між контактними елементами, змочуваність поверхні контактних елементів та ін.) коректне теоретичне описання яких в їх сукупності впливу значно ускладнене. Тому урахування зрощення на гідравлічний опір визначимо через введення величини фактору зрощення f_L , який враховує вплив всієї низки параметрів. Повний гідравлічний опір ВМА запишеться

$$\Delta P = \left(\sum_{i=1}^n (\Delta P_0 + \Delta P_{\varphi_i} + \Delta P_{c_i}) \right) f_L. \quad (3.23)$$

Залежність для розрахунку f_L потребує визначення експериментальним шляхом.

3.3. Теоретичні дослідження гідродинаміки руху рідини в контактному пристрої ВМА

Рух рідини в досліджуваному контактному пристрої ВМА складається з характерних стадій, які багатократно повторюються в процесі руху в об'ємі ротора: утворення дисперсного потоку рідини на контактному елементі, рух краплинного потоку під дією відцентрової сили в вільному просторі між елементами та захоплення крапель, що рухаються, сітчастою поверхнею наступного контактного елемента. Кожна з цих стадій потребує окремого розгляду та математичного опису.

3.3.1. Формування дисперсної фази в контактному пристрої ВМА

Утворення дисперсної фази в досліджуваному контактному пристрої відцентрового масообмінного апарата відбувається на поверхні сітчастих кільцевих елементів під дією відцентрової сили.

На першому етапі (при відносно малих значеннях відцентрової сили) на поверхні контактних елементів утворюється суцільна плівка рідини. З плівки витягуються струмені, під дією зовнішніх та внутрішніх сил струмені розпадаються утворюючи краплі. Зі збільшенням відцентрової сили зменшується довжина і діаметр струменів. Відповідно зменшується розмір утворених крапель.

При певному значенні відцентрової сили суцільна плівка на поверхні кільцевих елементів руйнується і утворюється тонкий шар плівки на поверхні прутків сітки. В місцях перехресть прутків сітки за рахунок капілярних сил відбувається накопичення рідини, формування та відрив крапель.

В таких умовах спостерігається найбільш сталий режим утворення крапель, при цьому досягається мінімальний розмір утвореної дисперсної фази та найменша полідисперсність потоку [90, 91]. Такий режим визначений в якості робочого режиму диспергування рідини в ВМА.

Перехідні межі режимів визначаються величиною відцентрової сили, фізичними властивостями рідини, характеристиками поверхні на якій відбувається утворення дисперсної фази, а також величиною опору газу, що рухається протитоком рідині.

Розмір краплі в момент відриву від поверхні контактної насадки є важливим параметром для розуміння механізму диспергування в контактному пристрої ВМА. Сьогодні накопичена значна кількість дослідної інформації про передвідривні діаметри краплин від різних поверхонь [27, 29, 30, 58, 67-70, 99].

В практичному плані інтерес представляють аналітичні співвідношення, що пов'язують розмір краплі (еквівалентний діаметр) під час відриву з режимними параметрами процесу та властивостями рідини. З урахуванням багатофакторності та складності задачі, такі співвідношення можуть бути отримані з рядом наближень та припущень:

- всі краплі, що утворюються на одному кільцевому елементі в однакових умовах, мають однаковий розмір, при їх утворенні відсутній взаємний вплив та коалесценція;
- впливом сили Архімеда та сили тяжіння нехтуємо внаслідок їх малості;
- між каплею та середовищем відсутні процеси тепломасообміну та відсутні хімічні перетворювання в краплі;
- контактні елементи мають змочувану поверхню.

При незначних швидкостях росту краплі, форма їх поверхні на усіх стадіях росту визначається рівнянням гідростатичної рівноваги. Для визначення діаметру краплі розглянемо баланс діючих на краплю сил в момент відриву (рис.3.3).

На краплю в момент відриву діє відцентрова сила ($F_{\text{вц}}$), капілярна сила (F_{σ}) та сила опору газу (F_2). Умова рівноваги діючих сил запишеться у вигляді

$$\begin{cases} F_{\sigma} \cos \beta = F_{вц} - F_2 \cos \alpha \\ F_{\sigma} \sin \beta = F_2 \sin \alpha \end{cases} . \quad (3.24)$$

де $F_{вц} = \frac{\pi d_{екв}^3}{6} \rho_p \cdot \omega^2 r$ – відцентрова сила, Н;

$F_{\sigma} = \pi d_0 \sigma$ – сила поверхневого натягу, Н;

$F_2 = \xi \cdot S_k \cdot \frac{\rho_2 w^2}{2}$ – сила опору тертя газу, Н;

$d_{екв} = \sqrt[3]{\frac{6V_{кр}}{\pi}}$ – еквівалентний за об'ємом діаметр краплі, м.

S_k – площа перетину краплі, м².

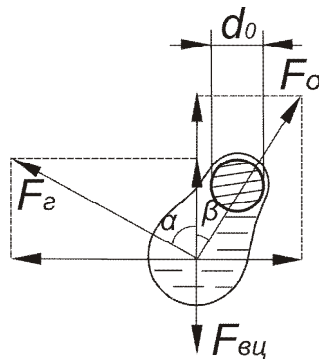


Рис.3.3. Схема розподілу сил при формуванні краплі в контактному пристрої ВМА

Зводячи в квадрат обидва рівняння системи (3.24) та додаючи їх між собою отримаємо

$$F_{\sigma}^2 = F_{вц}^2 + F_2^2 - 2F_{вц}F_2 \cos \alpha . \quad (3.25)$$

В режимах краплеутворення при відриві від чарунки та прутка сітки визначальним геометричним параметром, що впливає на розмір краплі, є відповідний розмір чарунки або прутка сітки (d_0).

Величина кута α функціонально залежить від співвідношення радіальної та колової швидкості газу $\alpha = f(w_r, w_\varphi)$. За фізичним впливом на процес формування краплі складові швидкості газу, і відповідно сили опору газу, мають протилежне значення. Рух газу в радіальному напрямку сприяє утриманню краплі в передвідривному стані, коловий рух навпаки діє в напрямку відриву краплі. Таким чином існують два граничні випадки.

При $\alpha = 0$ (рух газу відбувається тільки в радіальному напрямку) рівняння (3.25) має вигляд

$$F_\sigma^2 = (F_{\text{вц}} - F_z)^2. \quad (3.26)$$

При $\alpha = 90$ (рух газу відбувається тільки в коловому напрямку)

$$F_\sigma^2 = F_{\text{вц}}^2 + F_z^2. \quad (3.27)$$

Як видно з (3.26) та (3.27) газова фаза має двоякий вплив на розмір краплі, що утворюється при диспергуванні рідини в контактному пристрої. Остаточний вплив газової фази в реальних умовах залежить від співвідношення радіальної та колової складової сили опору газу, що в отриманій залежності (3.25) враховано через кут α .

Рівняння (3.25) є рівнянням 4-го порядку відносно $d_{\text{екв}}$ і не має рішення в загальному вигляді. При цьому також складність представляє точне визначення сили тертя газу. Для цього необхідно знати коефіцієнт гідравлічного опору, який залежить від форми краплі в передвідривному стані, визначення якої також є складною та багатофакторною задачею.

Виходячи з цього застосуємо наближений підхід для оцінки впливу газової фази на розмір краплі, що утворюється. В результаті необхідно порівняти розмір краплі, що утворюється без руху газу та при наявності сили опору тертя газової фази.

При прийнятті наближених величин всі значення беремо такими, щоб забезпечити найбільш можливий в таких умовах розмір краплі. Тобто метою оцінки є визначення максимального відхилення розміру краплі в двох випадках: при наявності опору газу та без урахування впливу газової фази.

Як було показано вище, газ здійснює двоякий вплив на розмір краплі. Якщо вектор руху газу співпадає з вектором капілярної сили, то опір газу максимально сприяє збільшенню розміру краплі. Для оцінки максимального розміру краплі приймаємо, що вектор сили опору газу і вектор капілярної сили співпадають.

Визначення площі перетину краплі в передвідривному стані (S_k) проводимо за величиною $d_{екв}$.

Для визначення коефіцієнту гідравлічного опору краплі застосуємо відомий підхід до визначення опору несферичних тіл. При цьому коефіцієнт опору визначається як коефіцієнт опору для сфери і вводиться значення фактору форми або коефіцієнту сферичності $k_{сф}$ [77]. Величина $k_{сф}$ знаходиться як відношення площі поверхні еквівалентної за об'ємом сфери до поверхні краплі $k_{сф} = F_{сф} / F_{кр} = 0,878 V_{кр} / F_{кр}$. Для визначення поверхні несферичних тіл і розрахунку $k_{сф}$ використаємо рекомендації, наведені в [70, 75]. При цьому, як було сказано вище, приймаємо максимально можливе значення $k_{сф}$.

При аналізі впливу газової фази за описаним підходом, отримано, що відхилення діаметру краплі з урахуванням сили опору газу від діаметру без урахування цієї сили складає не більше 10%. Враховуючи це, а також достатню складність коректного урахування сили опору газу, в подальшому для оцінки розміру краплі при відриві опором газу нехтуємо.

Таким чином, з (3.25) умова балансу діючих сил визначається силою поверхневого натягу та відцентровою силою, направленими протилежно, тобто $F_{\sigma} = F_{вц}$. Звідси еквівалентний діаметр краплі дорівнює

$$d_{екв} = \sqrt[3]{\frac{6 d_0 \sigma}{(\rho_p - \rho_z) \omega^2 r}} \quad (3.28)$$

Залежність (3.28) встановлює еквівалентний (по об'єму) діаметр краплі перед відривом і отримана для умов гідростатики. В реальних умовах розмір краплі, що утворюється, відрізняється від $d_{екв}$. Це пов'язане в першу чергу з різницею статичних та динамічних умов краплеутворення, а також частковим впливом газової фази.

Для врахування відмінності розміру краплі, що утворюється (d_k) від еквівалентного ($d_{екв}$) за (3.28) введемо коефіцієнт k_V . Залежність для визначення розміру утвореної краплі запишеться

$$d_k = k_V \cdot d_{екв} = k_V \sqrt[3]{\frac{6 d_0 \sigma}{(\rho_p - \rho_z) \omega^2 r}} \quad (3.29)$$

Велична k_V враховує вплив локальних умов утворення краплі. В ряді теоретичних та експериментальних робіт [60, 106-110], визначене різними авторами значення k_V відрізняється. При чому є значення як $k_V > 1$, так і $k_V < 1$, тобто крапля після відриву може мати розмір як більший, так і менший за еквівалентний. При аналізі цих робіт можна відмітити, що в більшості випадків значення $k_V > 1$ спостерігається при утворенні краплі на зрізі капіляру, а $k_V < 1$ при відриві від твердих поверхонь. Крім того величина k_V залежить від контактного кута змочування [111]. У випадку краплеутворення в ВМА на k_V додатково впливає рух газової фази.

Все це показує багатофакторність залежності k_V від локальних умов утворення та відриву краплі, складність його визначення в загальному вигляді і необхідність застосування експериментального шляху визначення k_V .

3.3.2. Рух крапель рідини в вільному об'ємі контактної пристрої

Розглянемо краплю, що рухається в контактній пристрої ВМА протитоком газової фази. Рух краплі відбувається у нестационарному режимі під дією відцентрових сил, сил тяжіння, сил Коріоліса, сил Архімеда та сил опору газової фази.

Швидкість руху частки наближається до постійної через невеликий проміжок часу, але шлях, який пройде крапля за цей час, достатньо великий порівняно з розмірами контактної пристрої ВМА.

Швидкість польоту визначає час існування краплі від її утворення до руйнування, що впливає на величину кількості утримуваної рідини і відповідно створювану в апараті дисперсною фазою поверхню контакту.

Для визначення швидкості вільного польоту краплі між пакетами насадки, а також швидкості краплі в момент її зіткнення з кожним наступним кільцевим контактним елементом, використовуємо енергетичний підхід. При цьому впливом сил тяжіння, сил Коріоліса та сили Архімеда нехтуємо внаслідок їх малості. Крім того враховуємо, що на швидкість руху краплі в радіальному напрямку впливає опір газової фази, причому тільки складова опору, направлена протитечію до напрямку руху рідини, тобто радіальна складова швидкості газу (w_ϕ). Умова рівноваги сил, що діють на краплю при її русі, визначається згідно закону збереження енергії:

$$\frac{m_p w_0^2}{2} + m_p a_{\text{вц}} \Delta r - F_{\text{оз}} \Delta r = \frac{m_p w_p^2}{2}, \quad (3.30)$$

де m_p – маса краплі, кг;

w_0 – початкова швидкість, м/с;

Δr – відстань між кільцевими елементами насадки, м;

$F_{\text{оз}} = \xi \frac{\pi d_k^2}{4} \cdot \frac{\rho_g w_{\text{відн}}^2}{2}$ – опір газової фази;

$w_{\text{відн}} = w_p + w_z$ – відносна швидкість руху фаз, м/с.

Після алгебраїчних перетворювань отримаємо

$$w_p^2 = w_0^2 + 2\omega^2 r \cdot \Delta r - 4\xi \frac{1}{d_k} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \Delta r (w_p + w_z)^2. \quad (3.31)$$

Введемо заміну:

$$k_1 = w_0^2 + 2\omega^2 r \cdot \Delta r, \quad (3.32) \quad k_2 = 4\xi \frac{1}{d_k} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \Delta r. \quad (3.33)$$

Залежність (3.31) з урахуванням (3.32) та (3.33) має вигляд

$$w_p^2 - k_1 + k_2 w_p^2 + 2k_2 w_p w_z + k_2 w_z^2 = 0. \quad (3.34)$$

Вирішуючи (3.34) відносно w_p і враховуючи протитечійний режим руху фаз отримаємо

$$w_p = \frac{1}{k_2 + 1} \left((k_1 k_2 + k_1 - k_2 w_z)^{0,5} - k_2 w_z \right). \quad (3.35)$$

При захопленні дисперсної фази на кільцевому елементі відбувається повне гасіння її швидкості, тому при наступному диспергуванні початкову швидкість краплі приймаємо $w_0 \approx 0$ Замінюючи k_1 та k_2 отримаємо

$$w_p = \frac{-4\xi \frac{1}{d_k} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \Delta r \cdot w_z + \sqrt{8\xi \frac{1}{d_k} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \omega^2 r \cdot \Delta r^2 + 2\omega^2 r \cdot \Delta r - 4\xi \frac{1}{d_k} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \Delta r \cdot w_z}}{4\xi \frac{1}{d_k} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \Delta r + 1} \quad (3.36)$$

З урахуванням заміни $k_3 = 2\omega^2 r \cdot \Delta r$ маємо

$$w_p = \frac{1}{k_2 + 1} \left((k_3 k_2 + k_3 - k_2 w_z)^{0,5} - k_2 w_z \right). \quad (3.37)$$

Значення коефіцієнту опору ξ (який входить до комплексу k_2) в рівнянні (3.37) визначається відповідно до режиму руху краплі. Відомі залежності для ξ отримані в умовах руху крапель в гравітаційному полі. Допускаємо, що з певним наближенням ці залежності можна застосувати в умовах поля відцентрових сил.

Для ламінарного режиму ($Re < 2$) можна використовувати відому формулу Стокса $\xi = 24 / Re$. Більш точні результати дає розрахунок за

формулою Озеена $\xi = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right)$ або Гольдштейна

$$\xi = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1280} Re^2 + \dots \right) [101, 111, 112].$$

Для перехідного режиму $2 < Re < 500$ в результаті аналізу ряду досліджень, приведених в [101, 111] для крапель рідини пропонується використовувати

емпіричну залежність $\xi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$, розрахунок за якою дає достатнє

наближення до результатів експерименту.

Для автотурбулентного режиму (область дії квадратичного закону опору Ньютона) $Re > 500$ $\xi = 0,44$ [77, 112].

При цьому критерій Рейнольдса доцільно визначати по швидкості газу в даному перерізі, а потім при необхідності уточнювати з застосуванням методу ітерацій. В результаті аналізу визначений діапазон Re для робочих режимів ВМА який складає 50...500. Тобто рух дисперсної фази відбувається в перехідному режимі, в деяких випадках наближуючись до автотурбулентного.

В процесі руху краплі під впливом опору газу може відбуватися її деформація (аж до руйнування). Деформація краплі змінює характер її обтікання та збільшує похибку при розрахунку коефіцієнту гідравлічного опору за вищенаведеними залежностями, які визначені для сферичних часток. Стійкість краплі оцінюють за величиною критерію Вебера, критичне значення якого відрізняється в різних джерелах [32, 111], але в усіх випадках більше за 1. В роботі [32] показано, що при швидкості руху краплі на 15-20%

меншій за критичну (при якій відбудеться її руйнування) можна приймати краплю як тверду шароподібну частку. Проведений аналіз величини We для дисперсної фази, що утворюється в робочих режимах в ВМА, показав, що число $We < 1$. Тому цілком обґрунтоване застосування наведених залежностей для коефіцієнту гідравлічного опору дисперсних часток в контактному пристрої ВМА.

3.3.3. Захоплення рідини на контактному елементі

Диспергована сітчастим елементом рідина рухається в вільному просторі між елементами і в певний момент досягає перерізу контактної пристрою, де знаходиться наступний контактний елемент. Далі можливе захоплення краплі на поверхню сітки або вільне її проходження крізь отвір (чарунку).

В режимі утворення крапель на прутках сітки (перехрестях прутків) визначальним геометричним параметром, що впливає на розмір краплі при відриві, є діаметр прутка. Згідно діючих стандартів на плетену та ткану металеву сітку в переважній більшості типорозмірів діаметр прутків менший за крок чарунки [92-94], тобто при використанні стандартних типів сітки можливе утворення крапель меншого розміру, ніж розмір чарунки. Це ставить можливим випадок проходження крапель рідини крізь сітку без захоплення на контактному елементі. Таким чином, виникає задача оцінки можливості захоплення краплі на поверхню сітки.

Факт вільного проходження крапель крізь чарунку в контактному пристрої ВМА негативно впливає на роботу апарата. Це знижує активність оновлення дисперсної фази і відповідно поверхні контакту, зменшує ступінь використання кінцевих ефектів та перемішування в середині фази і викликає повздовжнє перемішування в апараті.

Отримання моделі для визначення ступеню захоплення краплин рідини на елементах контактної пристрою дозволяє визначити розподіл в контактному пристрої потоку рідини за дисперсністю, що в свою чергу дає

змогу прогнозувати кількість утримуваної в диспергованому вигляді рідини та відповідну величину поверхні контакту фаз.

Як було показано вище в залежності від параметрів проведення процесу існують різні режими утворення крапель. В струменевому режимі та режимі краплеутворення при відриві від плівки поверхня кільцевого елемента вкрита плівкою рідини. В такому випадку ступінь захоплення краплі на поверхню сітки близька до 100%. Також повне захоплення буде в будь-якому режимі формування крапель при умові, що розмір крапель перевищує розмір чарунки. Крім того, зменшує вірогідність проскакування краплі протитечійний рух газу в чарунках сітки.

Коректне урахування впливу гідродинаміки газу на зменшення вірогідності захоплення краплі сітчастою поверхнею є достатньо складною задачею, тому в першому наближенні розглянемо умови захоплення або вільного проходження краплі крізь сітку без урахування впливу газу та за умов диспергування в режимі відриву від прутка (плівка на поверхні сітки відсутня).

Вірогідність настання події вільного проходження краплі крізь чарунку або її захоплення визначається співвідношенням розмірів краплі та чарунки сітки (рис. 3.5).

Очевидно, що крапля проходить через чарунку без захоплення при умові якщо її геометричний центр попадає в заштриховану область S (рис. 3.5).

Вірогідність такої події визначається співвідношенням відповідних площ (з урахуванням площі прутків)

$$P = \frac{(A - d_k)^2}{(A + d_{np})^2}. \quad (3.38)$$

Імовірність захоплення краплини на контактному елементі дає змогу визначити розподіл рідкої фази по дисперсності в об'ємі контактної пристрою, що дозволяє побудувати модель для прогнозу відповідної

поверхні контакту фаз ($ПКФ_{кр}$) та кількості утримуваної рідини ($КУР_{кр}$) в вигляді дисперсної фази. Для цього розглянемо модель руху рідини через контактний пристрій (рис.3.6).

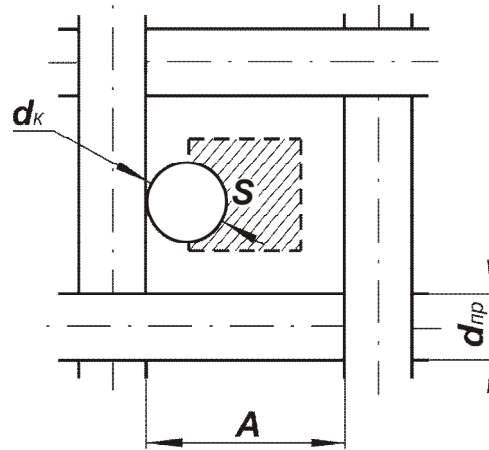


Рис. 3.5. Схема моделі вільного проходження краплі через чарунку сітки

Рідина зі зрошувача диспергується на внутрішньому кільцевому елементі. Утворений дисперсний потік під дією відцентрової сили рухається в радіальному напрямку до перетину наступного кільцевого елемента, де частина крапель захоплюється, утворює нову дисперсну фазу, а частина проходить далі.

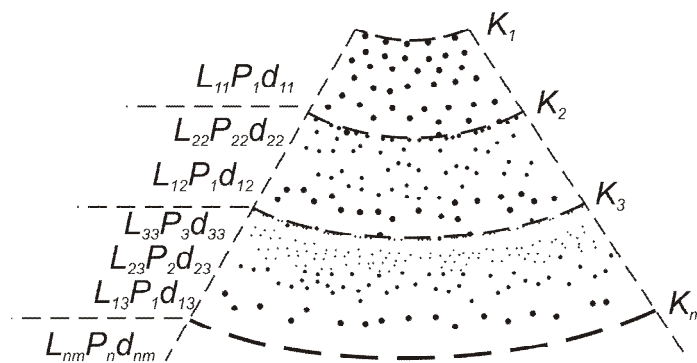


Рис. 3.6. Модель руху дисперсної фази в контактному пристрої ВМА

В просторі за другим кільцевим елементом існують краплі двох розмірів, які в перетині третього елемента також частково захоплюються, кожна з відповідною вірогідністю P . Таким чином, в процесі руху відбувається

багатократна зміна дисперсності потоку. Рух відбувається при протитечійній дії газу, сила опору якого перемінна по радіусу контактної пристрою.

При моделюванні прийняті наступні припущення:

- на кожному контактному елементі утворюються краплі в одному режимі диспергування і однакового розміру;
- в процесі вільного руху крапель не відбувається їх вторинного руйнування або коалесценції;
- всі контактні елементи виготовлені з сітки одного розміру чарунок та прутків;
- всі краплі, що зіштовхнулися з прутком контактної пристрою, захоплюються.

Позначимо номери контактних елементів починаючи з внутрішнього по ходу руху рідини $K_1 \dots K_m$. Діаметр краплі позначимо як d_{nm} , де індекс n відповідає номеру контактної елементу, на якому утворилася крапля, а індекс m – вільному простору за елементом K_m на якому крапля d_{nm} існує. Витрата рідини L_{nm} відповідає частині загальної витрати, що існує в перерізі K_m у вигляді крапель розміру d_{nm} .

На першому кільцевому елементі вся рідина, що надходить зі зрошувача, диспергується, тобто $L_{11} = L$. На другому кільці частина рідини захоплюється і утворює нову дисперсну фазу, а частина «проскакує» через чарунки. Розподіл витрати рідини в перерізі K_2 між краплями діаметру d_{12} та d_{22} дорівнює

$$L_{12} = L \cdot P_1, \quad (3.39) \quad L_{22} = L \cdot (1 - P_1). \quad (3.40)$$

На третьому кільцевому елементі захоплюється частина крапель, що утворилися на першому кільці розміром d_{13} , і частина, утворених на другому розміром d_{23} , які утворюють при диспергуванні на елементі K_3 краплі d_{33} . Інша частина крапель проходять вільно без захоплення. Тобто:

$$L_{13} = L \cdot P_1^2, \quad (3.41) \quad L_{23} = L \cdot P_2, \quad (3.42)$$

$$L_{33} = L - (L_{13} + L_{23}) = L - \left(1 - (P_1^2 + P_2)\right). \quad (3.43)$$

В загальному вигляді розподіл витрати рідини за дисперсністю в перерізі K_m запишеться

$$L_{nm} = L \cdot P_n^{m-n} \text{ при } n < m, \quad (3.44)$$

$$L_{nm} = L \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{n-1} (P_i^{m-i})\right) \text{ при } n = m. \quad (3.45)$$

Кількість утримуваної рідини KUP_{nm} дорівнює

$$KUP_{nm} = L_{nm} \cdot w_{nm}, \quad (3.46)$$

де w_{nm} – швидкість руху краплі d_{nm} в просторі за елементом K_m , м/с.

Величина w_{nm} визначається за (3.37). Поверхня контакту фаз $ПКФ_{nm}$ відповідно складає

$$ПКФ_{nm} = N_{nm} \cdot F_{nm} = \frac{KUP_{nm}}{V_{nm}} F_{nm} = \frac{6}{d_{nm}} KUP_{nm}, \quad (3.47)$$

де N_{nm} – кількість крапель d_{nm} в просторі за елементом K_m , шт.;

$$F_{nm} = \pi d_{nm}^2 \text{ – поверхня краплі, м}^2;$$

$$V_{nm} = \frac{1}{6} \pi d_{nm}^3 \text{ – об'єм краплі, м}^3.$$

Загальна величина кількості утримуваної рідини та поверхні контакту фаз визначається

$$KUP = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (KUP_{ij}), \quad (3.48)$$

$$ПКФ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (ПКФ_{ij}). \quad (3.49)$$

Результати розрахунку за (3.48) та (3.49) наведені на рис. 3.7 та 3.8.

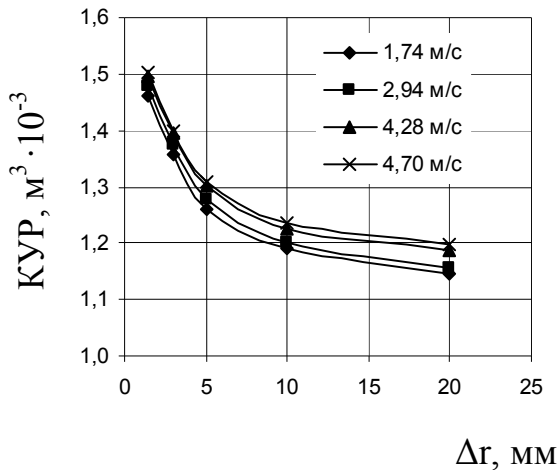


Рис. 3.7. Залежність КУР від кроку між елементами при різних швидкостях газу

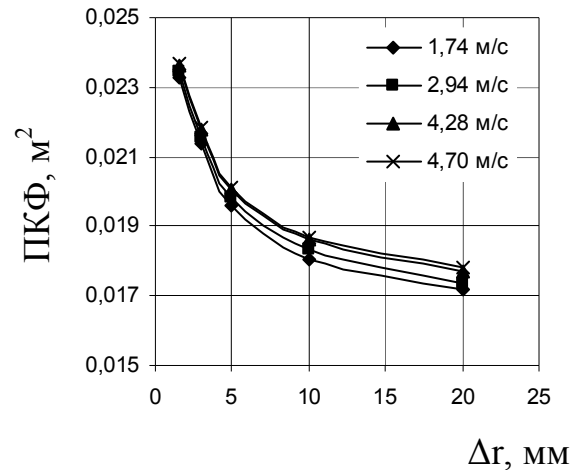


Рис. 3.8. Залежність ПКФ від кроку між елементами при різних швидкостях газу

3.4. Висновки до третього розділу

Розроблена фізична модель взаємодії фаз в диспергуючому контактному пристрої ВМА. Отримані математичні моделі, які описують гідродинаміку фаз в апараті.

Побудована математична модель, що описує розподіл швидкостей газу в середині контактної пристрою та встановлює залежність гідравлічного опору від режимних характеристик роботи ВМА та конструктивних особливостей контактної пристрою.

Для гідродинаміки рідкої фази:

- теоретично визначені режими диспергування рідини в середині контактної пристрою;
- отримані залежності для визначення розміру крапель в різних режимах краплеутворення в однофазній та двофазній (з урахуванням дії газу) системах;
- отримана модель для визначення швидкості руху крапель в вільному просторі між контактними елементами;

- визначені умови та фактори розподілу дисперсності рідини по радіусу контактної пристрою, побудована модель визначення дисперсного розподілу на основі якої виконаний розрахунок кількості утримуваної в вигляді дисперсної фази рідини та відповідної поверхні контакту фаз.

При цьому ряд параметрів отриманих моделей, як для рідкої, так і для газової фази, потребує експериментального визначення.

Основні результати розділу опубліковані в працях [76, 90, 95, 113].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА МАСООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО МАСООБМІННОГО АПАРАТА

4.1. Дослідження гідродинаміки газової фази в ВМА

Ефективність процесів масопереносу визначається створюваною в апараті гідродинамічною обстановкою. Характер гідродинамічної взаємодії визначається конструктивними особливостями апарата і контактної пристрою та режимними параметрами його роботи.

Візуальні дослідження гідродинаміки газу в контактній пристрої виконували методом ниток. На контактних елементах закріплювали тонкі нитки, по напрямку коливань яких визначається характер руху газової фази. Результати фіксували за допомогою фотозйомки.

В результаті експерименту отримано: нитки, закріплені на периферичній поверхні кільцевих елементів нагинаються в напрямку руху ротора; нитки закріплені на внутрішній поверхні – притиснені до сітки з внутрішньої сторони (рис.4.1).

Це свідчить про те, що рух газу в контактній пристрої розробленої конструкції відбувається по спіралеподібній траєкторії. При цьому колова складова швидкості перевищує лінійну швидкість обертання контактної елемента (кут нахилу «зовнішніх» ниток в напрямку обертання свідчить про випередження газом контактної пристрою в коловому напрямку). Радіальна складова, в свою чергу, незначна в порівнянні з відцентровою силою («внутрішні» нитки притиснуті до поверхні сітки, тиску газу в радіальному напрямку недостатньо для їх випрямлення).

Отримані дані підтверджують адекватність розробленої фізичної моделі взаємодії фаз.

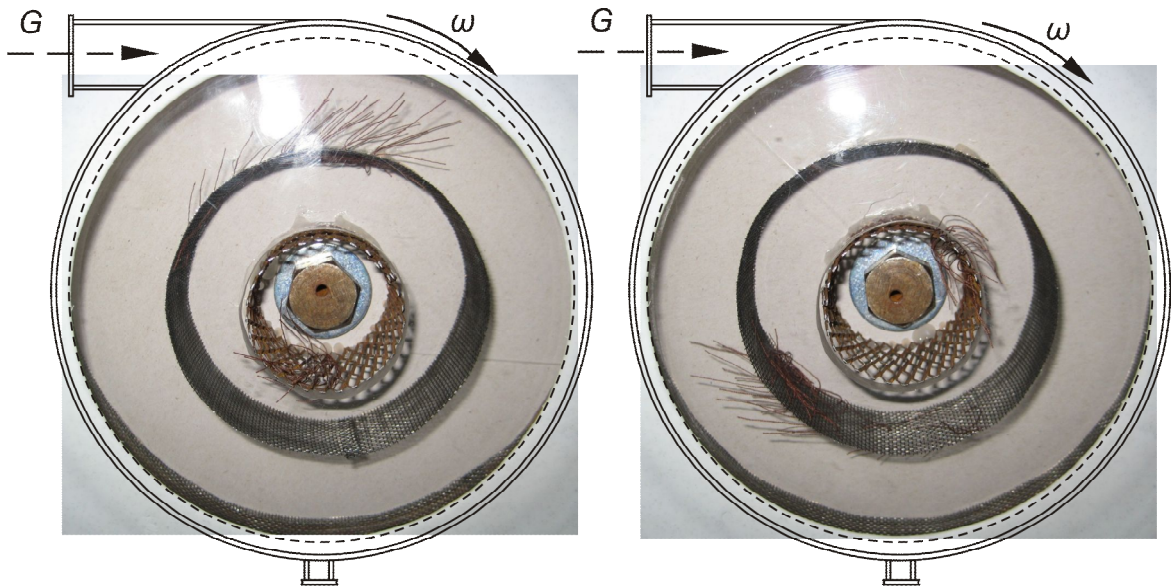


Рис.4.1. Результати візуалізації руху газу в контактному пристрої ВМА

Дослідження гідродинамічних характеристик газової фази проводили за величиною перепаду тиску (ΔP). Визначення величини ΔP проводили в залежності від режимних характеристик – швидкість газу, щільність зрошення та частота обертання ротора [74, 95].

Дослідження проводили на серії контактних пристроїв, які відрізнялись кроком між встановленими кільцевими елементами (і відповідно кількістю елементів). Результати експериментальних досліджень перепаду тиску представлені в додатку Б.

Особливістю геометричної конструкції ВМА є зміна перетину вздовж радіусу. Внаслідок цього величини режимних параметрів (швидкість газу, щільність зрошення, величина відцентрової сили) є також змінними. Тому при проведенні експерименту та обробленні отриманих даних використовували середні значення цих показників (приведені на середній перетин контактної пристрою).

Порівняльна залежність перепаду тиску сухого та зрошеного контактної пристрою наведена на рис. 4.2. Дані наведені для пристрою з сітки 1,6x0,4, крок між елементами 0,01 м. Такий характер залежностей

спостерігається і для сіток з іншим розміром чарунки і прутка та кроку між встановленими елементами.

В результаті відмічена певна особливість. На рис. 4.2 видно, що при швидкостях обертання більше 150 рад/с величина ΔP для зрошеного апарата дещо менше, ніж для сухого.

Факти зниження перепаду тиску в умовах зрошення відмічаються в ряді робіт, присвячених дослідженню різних конструкцій відцентрових апаратів [4, 10, 97–100]. При цьому в літературі відсутні достатні обґрунтування такої картини, всі пояснення надаються авторами на рівні гіпотез та допущень, без глибокого аналізу такої ситуації. Виявлена гідродинамічна особливість потребує окремого розгляду та дослідження, що не було задачею даної роботи і в подальшому не розглядається.

Втрати тиску сухого апарата зростають зі зростанням швидкості обертання, що є наслідком збільшення діючої на газ відцентрової сили.

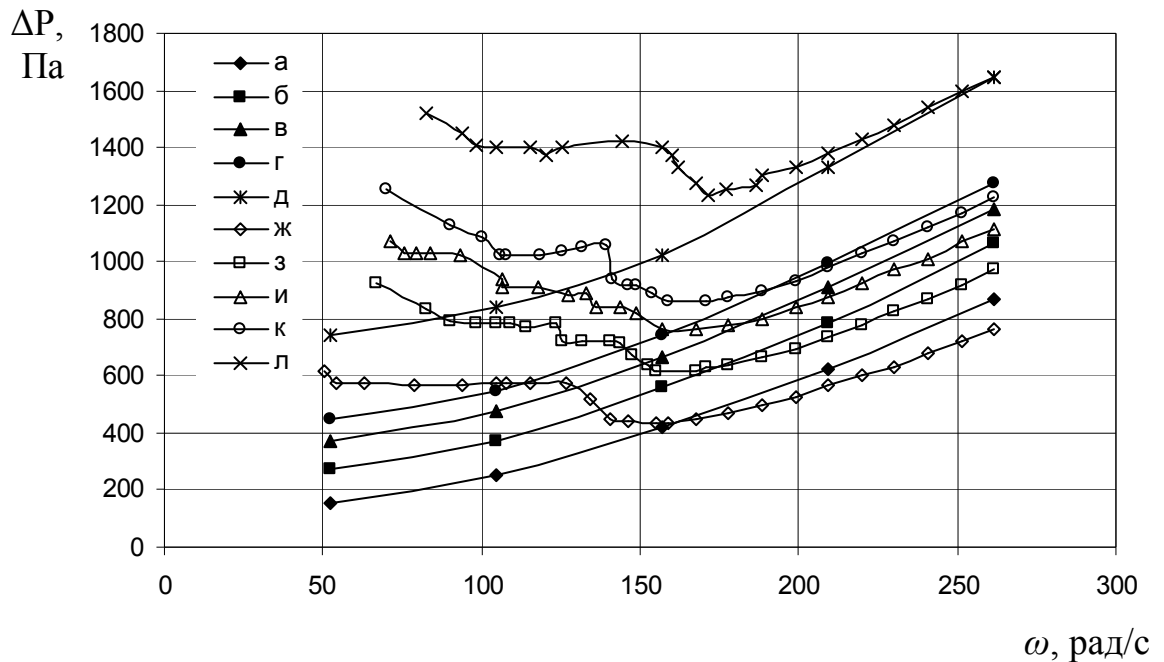


Рис. 4.2. Залежність перепаду тиску для апарата з сухим та зрошуваним контактним пристроєм від кутової швидкості обертання при швидкостях газу: а; б; в; г; д – 1,74; 2,46; 2,94; 3,25; 4,28 м/с для сухого ротора відповідно та: ж; з; и; к; л – 1,74; 2,46; 2,94; 3,25; 4,28 м/с для зрошеного ротора відповідно. Щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

В умовах зрошення при збільшенні швидкості обертання на першому етапі величина ΔP падає, потім зростає.

Зі зростанням відцентрової сили зростає швидкість руху рідини, зменшується товщина плівки і розміри крапель, зменшується кількість утримуваної в контактному пристрої рідини. Відповідно зменшується перекриття вільного перерізу рідиною і зменшується перепад тиску.

В подальшому, при достатньо високій відцентровій силі, досягається практично стале значення розміру дисперсної фази (як буде показано нижче), досягається мінімальна товщина плівки. В цьому діапазоні переважний вплив на величину ΔP відіграє зростаюча відцентрова сила, збільшення якої призводить до росту перепаду тиску.

Залежність гідравлічного опору від витрати рідини на зрошення показують, що характер впливу зрошення на гідравлічний опір відрізняється на різних швидкостях обертання ротора (рис. 4.3). При цьому, при більших швидкостях обертання ΔP практично не залежить від щільності зрошення.

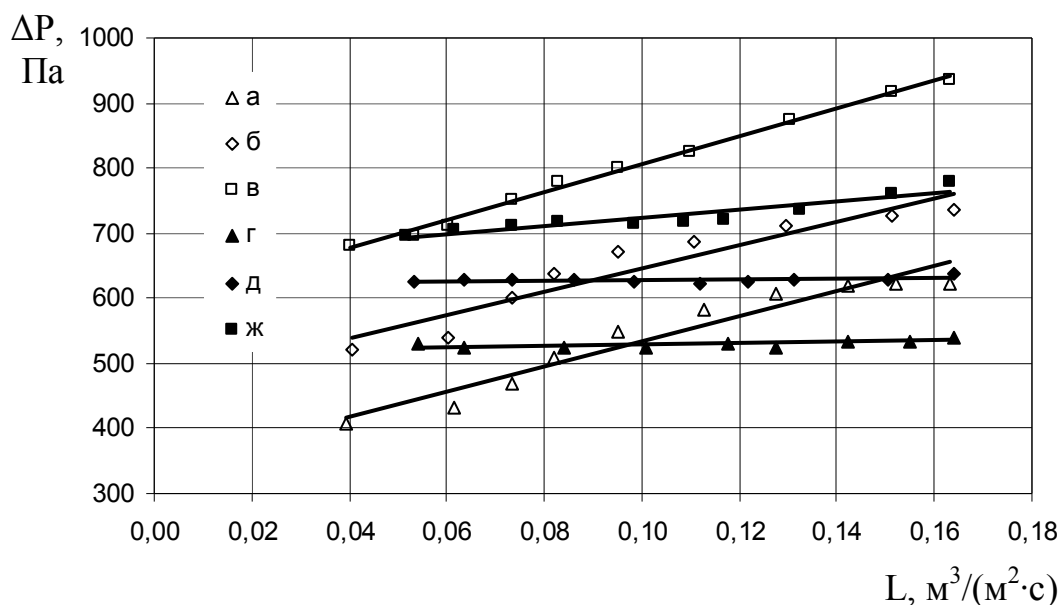


Рис. 4.3. Залежність перепаду тиску від витрати рідини на зрошення при швидкості газу: а, г – 1,74 м/с; б, д – 2,13 м/с; в, ж – 2,46 м/с. Зафарбовані маркери відповідають швидкості обертання 209 рад/с, порожні 157 рад/с. Крок між елементами $3 \cdot 10^{-3}$ м, сітка 1,6x0,4.

Для отримання залежностей перепаду тиску від відстані між кільцевими елементами, проводилися дослідження на серії контактних пристроїв зі змінним кроком між елементами. В контактному пристрої змінювали крок між елементами шляхом зміни їх кількості на ділянці фіксованого розміру в середині контактної пристрою (див. п.2.4.1 та рис.2.5). Таким чином, крок між елементами є зворотною величиною від кількості встановлених елементів. Така величина кроку використана в подальшому при аналізі отриманих експериментальних результатів.

При дослідженні ΔP для визначення впливу на опір кроку між контактними елементами використовувався запропонований нами підхід, описаний в п.2.4.1 та [76]. Застосування такого підходу дозволяє визначати втрату тиску саме досліджуваної ділянки зі змінною кількістю елементів і відповідно кроком між ними, що дозволяє більш якісно оцінювати гідродинамічну картину.

Однак, слід відзначити, що застосування описаного методу проведення експерименту та обробки даних можливе лише для незрошеного апарата. В умовах двофазної системи цей підхід використати неможливо, всі дані в умовах зрошення приведені в абсолютних значеннях ΔP повного контактної пристрою (а не досліджуваної ділянки). Аналіз даних проводиться порівнянням величини втрати тиску на пристроях з різним кроком між елементами.

Залежність ΔP незрошеного контактної пристрою від кроку між елементами наведена на рис. 4.4. Максимум в діапазоні $(0-5) \cdot 10^{-3}$ м обумовлений виникненням та виродженням власної турбулентності сітки. Такі результати відповідають даним досліджень гідродинаміки сіток, наведених в [104, 105].

При зростанні кроку між елементами в діапазоні від $5 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ м перепад тиску незрошеного апарата зростає. Зростання кроку призводить до збільшення вільного простору в об'ємі ротора, що в свою чергу викликає зростання колової складової швидкості газу. За рахунок цього збільшується

загальна швидкість газової фази і зростає перепад тиску. Величина w_φ пропорційна швидкості обертання ротора тому більших значеннях ω бачимо більш стрімкий характер зміни величини ΔP .

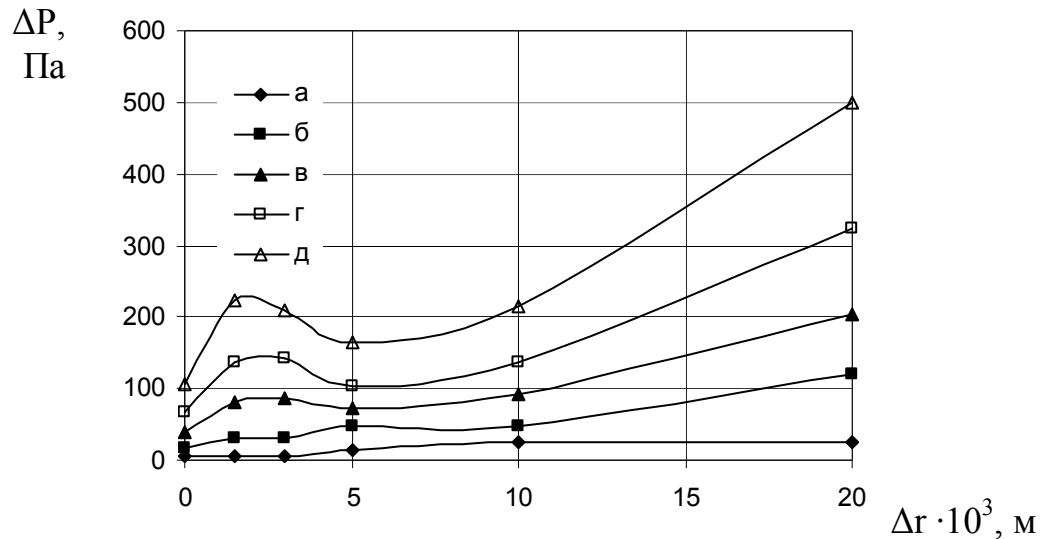


Рис. 4.4. Залежність перепаду тиску в сухому апараті від кроку між кільцевими елементами при швидкостях обертання: а – 52 рад/с; б – 105 рад/с; в – 157 рад/с; г – 209 рад/с; д – 262 рад/с. Швидкість газу 2,94 м/с

Залежність втрати тиску контактної пристрою від кроку між елементами при його зрошенні наведена на рис. 4.5.

В діапазоні $\Delta r = (0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м на рис. 4.5 спостерігається зменшення перепаду тиску зрошеної насадки. При цьому збільшується вільний переріз за рахунок появи відстані між елементами, зменшується ступінь перекриття рідиною і спостерігається зменшення ΔP .

Максимум на ділянці $\Delta r = (0 - 5) \cdot 10^{-3}$ м викликаний генерацією мікромасштабної турбулентності сітки та подальшим її виродженням. Такий характер відповідає відомим даним по гідродинаміці сіток [104, 105]. В діапазоні $\Delta r = (10 - 20) \cdot 10^{-3}$ м величина ΔP залишається практично незмінною при більших швидкостях обертання (крапки «в» та «г»), а при менших (крапки «а» та «б») – дещо зменшується, що є наслідком дії відцентрової сили.

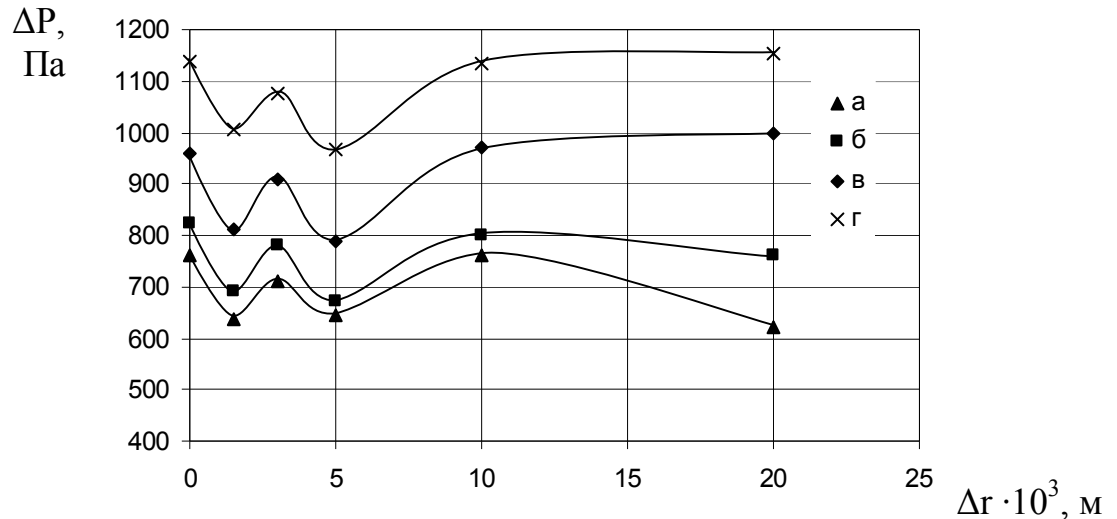


Рис. 4.5. Залежність перепаду тиску зрошеного апарата від кроку між кільцевими елементами при швидкостях обертання: а – 157 рад/с, б – 188 рад/с, в – 209 рад/с; г – 262 рад/с. Швидкість газу 2,94 м/с

Граничний режим роботи апарата визначається межею захлинання контактної пристрою, що залежить від навантаження по фазам. В відцентровому масообмінному апараті додатковим фактором, що впливає на захлинання, є швидкість обертання ротора.

Внаслідок конструктивних особливостей зрошувального пристрою лабораторної моделі ВМА, на якій проводилися дослідження, стадія захлинання досягнута не була. Тому в якості граничного режиму роботи був визначений початок активного бризковинесення рідини з внутрішньої частини контактної пристрою. Початок бризковинесення реєструвався візуально як стадія різкого збільшення винесення крапель рідини газовим потоком з апарата. При цьому реєструвалися поточні показання режимних параметрів процесу (швидкість газу та швидкість обертання ротора). За результатами експерименту отримана залежність для режиму, при якому починається бризковинесення, від швидкості обертання та швидкості газу (рис. 4.6).

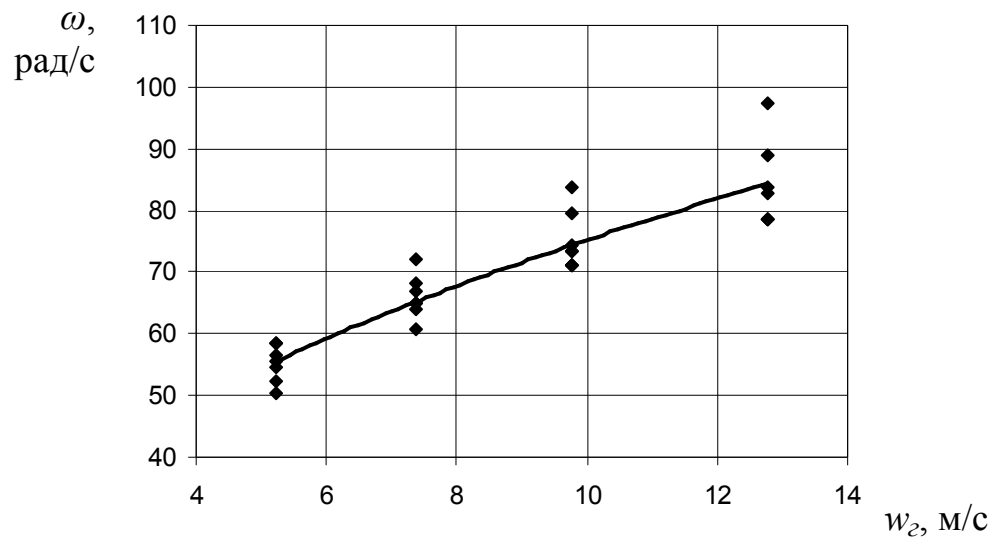


Рис. 4.6. Залежність початку бризковинесення від швидкості обертання та швидкості газу. Щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

4.2. Дослідження гідродинаміки рідини в контактному пристрої відцентрового масообмінного апарата

Важливим фактором для проведення ефективного масопереносу в газорідних системах є гідродинамічна обстановка, що створюється в апараті. Гідродинаміка взаємодіючих фаз в свою чергу залежить від конструктивних характеристик та режимних параметрів роботи обладнання.

В контактному пристрої рух рідини відбувається від центру ротора до периферії під дією відцентрової сили. В процесі руху в середині контактної пристрою на кожному сітчастому кільцевому елементі під дією відцентрової сили відбувається формування дисперсної фази.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження фізичної картини поведінки рідини дозволили виділити характерні режими утворення крапель. Факторами, що визначають перехід режимів є величина відцентрової сили та геометрія сітки (діаметр прутків та розмір чарунки).

При значенні відцентрової сили до 600 м/с^2 на поверхні кільцевого елемента формується та постійно утримується плівка рідини. На поверхні плівки з зовнішньої сторони кільця відбувається утворення («витягування») струменів рідини, які розпадаються на краплі (рис. 4.7). Розмір та форма

крапель в цьому режимі є достатньо неоднорідними і визначаються діаметром зруйнованих струменів та локальними умовами їх руйнування.

При збільшенні відцентрового прискорення і відповідно діючих масових сил спостерігається зменшення кількості та діаметру струменів, скорочення довжини їх суцільної частини. Зменшується і діаметр крапель, знижується полідисперсність потоку.

При подальшому зростанні відцентрового прискорення від 600 м/с^2 та більше суцільна плівка рідини на поверхні кільцевого елемента стає тоншою та руйнується. На поверхні прутків сітки утворюється тонкий шар плівки. В перехрестях прутків сітки за рахунок капілярних сил утримується рідина, в цих місцях відбувається формування та відрив крапель (рис. 4.8).

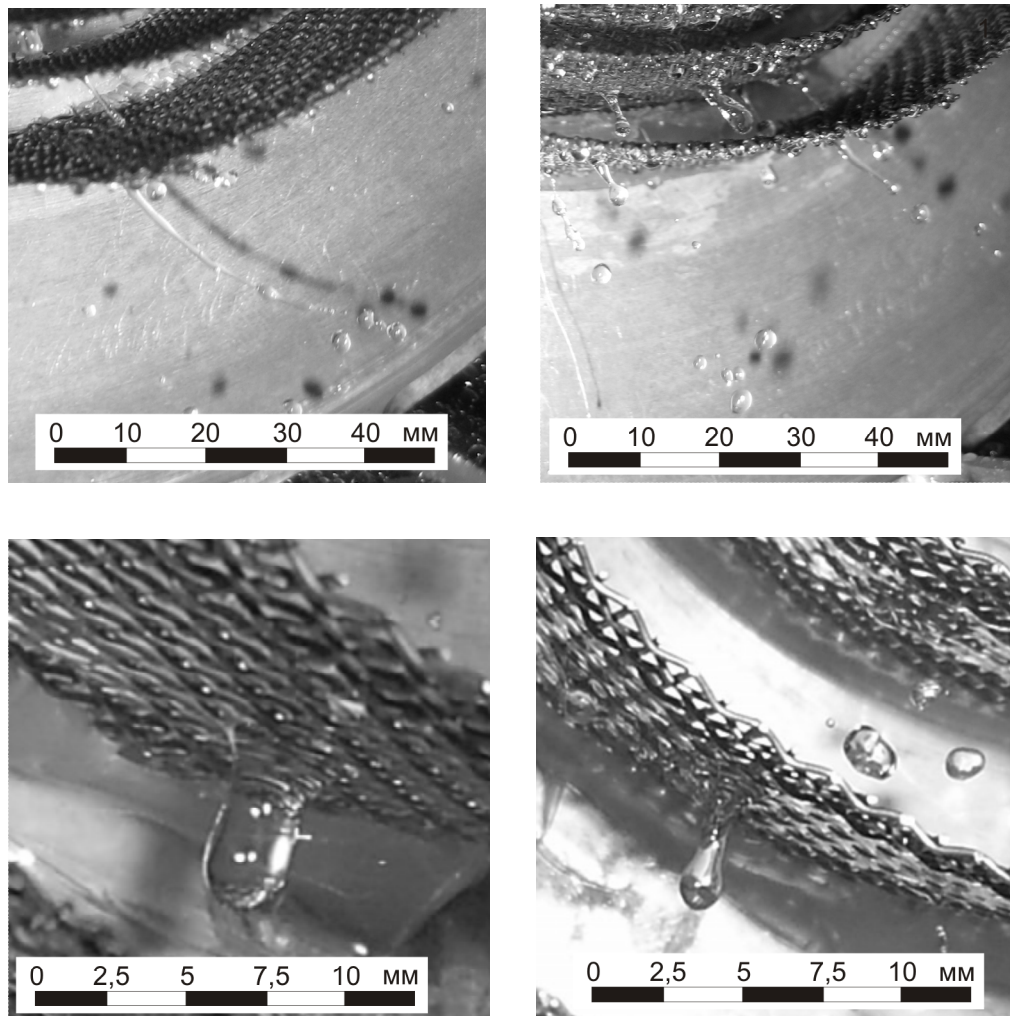


Рис. 4.7. Формування струменів та крапель на поверхні плівки

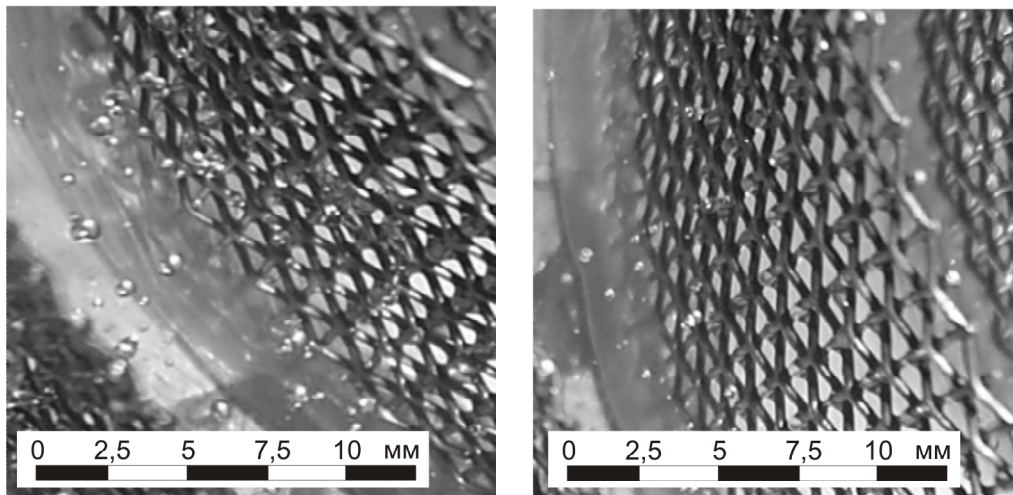


Рис. 4.8. Утворення крапель на перехрестях прутків сітки

При збільшенні значення відцентрового прискорення відрив від перехрестя прутків починає переважати над іншими механізмами краплеутворення. Цей режим характеризується зменшенням середнього розміру краплин та зниженням ступеню загальної полідисперсності.

Режим відриву крапель в перехрестях сітки є найбільш сталим і визначений як рекомендований робочий режим для ВМА.

Результати експерименту по дослідженню режимів диспергування отримані в однофазному потоці без урахування впливу газу. Протидіючий опір газової фази призводить до зміщення меж режимів в область більшої відцентрової сили.

Величина відцентрового прискорення $a_{вц} = \omega^2 r$ визначається частотою обертання ротора ω та радіусом розташування елемента контактної пристрою r . Таким чином, можна прогнозувати зміну режимів утворення дисперсної фази, як в залежності від частоти обертання ротора так і по радіусу контактної пристрою.

За результатами обробки експериментальних даних швидкісної фотозйомки режимів диспергування визначені закономірності розподілу крапель за розмірами, які наведені на рис. 4.9 – 4.12. Отримані експериментальні дані наведені в додатку А.

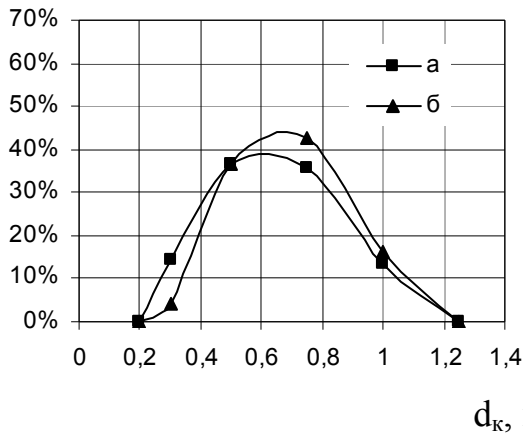


Рис. 4.9. Розподіл крапель за розмірами при $a_{вц} = 315,5 \text{ м/с}^2$ на сітках: а – $0,63 \times 0,32$; б – $1,6 \times 0,4$

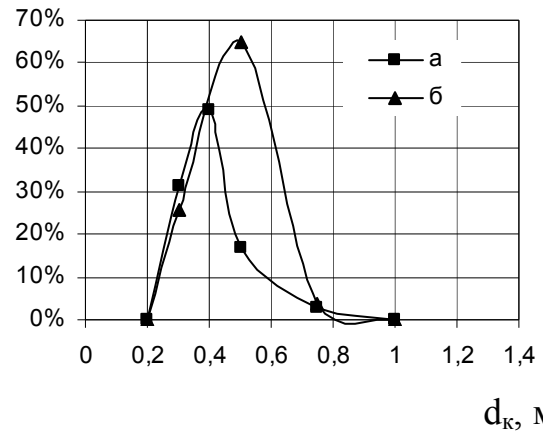


Рис. 4.10. Розподіл крапель за розмірами при $a_{вц} = 709,9 \text{ м/с}^2$ на сітках: а – $0,63 \times 0,32$; б – $1,6 \times 0,4$

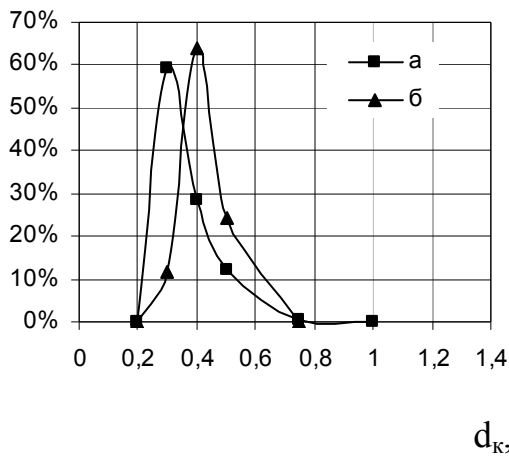


Рис. 4.11. Розподіл крапель за розмірами при $a_{вц} = 1262,0 \text{ м/с}^2$ на сітках: а – $0,63 \times 0,32$; б – $1,6 \times 0,4$

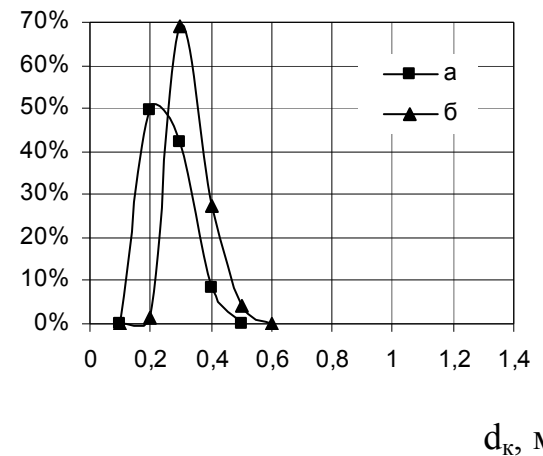


Рис. 4.12. Розподіл крапель за розмірами при $a_{вц} = 2386,0 \text{ м/с}^2$ на сітках: а – $0,63 \times 0,32$; б – $1,6 \times 0,4$

Отримані дані показують, що зі збільшенням відцентрової сили зменшується розмір крапель, звужується діапазон розмірів (різниця між максимальною та мінімальною краплею) та підвищується відсоток крапель одного розміру, тобто диспергований потік стає більш монодисперсним. Це підтверджується і візуальними спостереженнями поведінки рідини в контактному пристрої ВМА, описаними вище.

Таким чином, режим краплеутворення при відриві від прутка (перехрестя прутків) має найменшу, в порівнянні з іншими, величину

коливань параметрів потоку і є найбільш стабільними. Такий режим визначений в якості робочого для ВМА з диспергуючим контактним пристроєм розробленої конструкції.

Для оцінки експериментально отриманих дисперсних характеристик використовували спосіб осереднення крапель за розмірами через величини модального діаметра d_{mod} за залежністю (2.10) та об'ємно-поверхневого діаметру d_{32} за залежністю (2.11).

При визначенні d_{mod} оцінювали також величину середньоквадратичного відхилення σ_x розміру крапель від d_{mod} . Результати осереднення та оцінка відхилення σ_x наведені в додатку А.

Отримані дані осереднення дисперсності потоку величиною d_{mod} в залежності від відцентрового прискорення наведені на рис. 4.12.

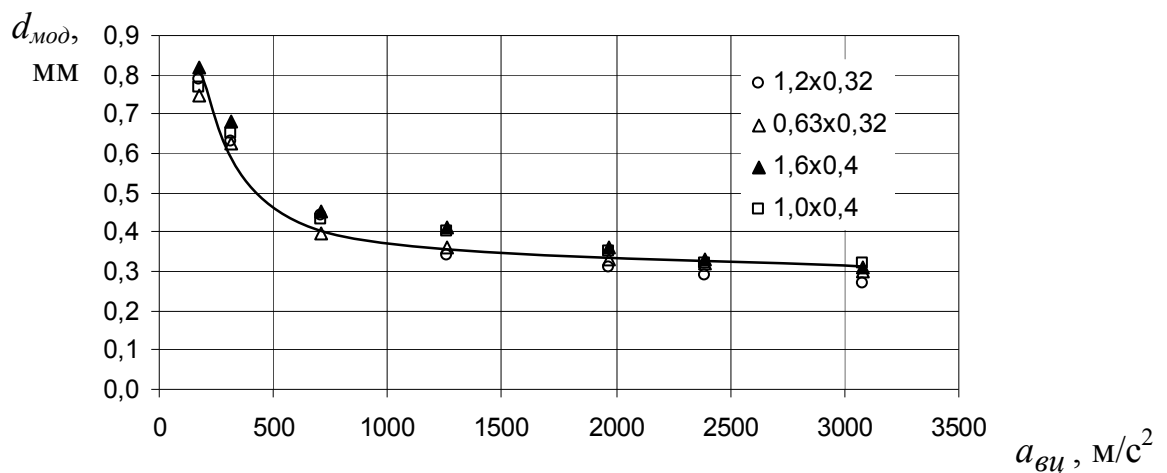


Рис. 4.12. Залежність d_{mod} від відцентрового прискорення для різних сіток

Величина d_{mod} фактично являє собою математичне очікування для нормально розподіленої випадкової величини розміру краплі. Наведені дані показують, що в діапазоні величини $a_{вц} > 1000$ м/с², величина d_{mod} в порівнянні з іншими режимами має мінімальне значення і практично не залежить від відцентрового прискорення. В цьому режимі формування крапель відбувається на перехрестях прутків, що утворюють плетіння сітки.

Тобто потік максимально наближається до монодисперсного і відхилення дисперсного розподілення від модального діаметру обумовлене

вільним проходженням крапель крізь чарунки сітки без захоплення та руйнування (тобто утворення краплі відбулося на одному з попередніх кільцевих елементів в інших умовах) та утворенням сателітів при відриві. Для цих режимів величину d_{mod} можна представити як

$$d_{mod} = k' \cdot d_k. \quad (4.1)$$

Величина d_k визначається за залежністю (3.29). Коефіцієнт k' в рівнянні (4.1) за фізичним змістом враховує локальні умови формування та відриву краплі, а також відхилення величини d_{mod} від d_k обумовлене утворенням сателітів та вільним проходженням краплі без захоплення на контактному елементі. Значення k' є функцією від відцентрового прискорення. Приймаємо в першому наближенні лінійну функціональну залежність k' від $a_{вц}$. В результаті обробки експериментальних даних в діапазоні $a_{вц}$ 1000-3000 м/с² отримане значення $k' = 0,79$. Таким чином, залежність (3.29) для визначення d_{mod} приймає вигляд

$$d_{mod} = 0,79 \sqrt[3]{\frac{6 d_0 \sigma}{\rho_p \omega^2 r}}. \quad (4.2)$$

Порівняння даних розрахунку модального діаметру за (4.2) та експериментально отриманих величин показує, що величина k' визначена з достатньою для інженерних розрахунків точністю, відхилення не перевищує $\pm 10\%$ (рис.4.13).

Для оцінки питомої поверхні контакту фаз, що утворюється при диспергуванні, експериментальні дані осереднювали за допомогою величини об'ємно-поверхневого діаметру d_{32} , який показує питому поверхню, що утворюється на одиницю об'єму рідини.

Діаметр d_{32} є способом математичного осереднення, якому не відповідає жодна фізична характеристика реального дисперсного потоку. І при цьому величина об'ємно-поверхневого діаметру дозволяє найбільш коректно

оцінювати характеристики дисперсного потоку при аналізі процесів масообміну.

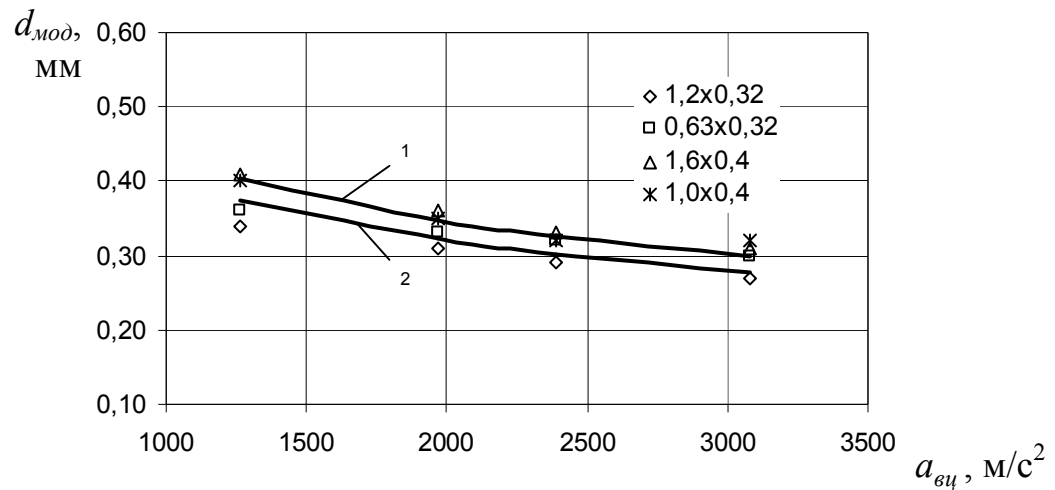


Рис. 4.13. Залежність модального діаметру від відцентрового прискорення для різних типів сітки: 1 – розрахунок за (4.2) при $d_0 = 4 \cdot 10^{-4}$ м; 2 – розрахунок за (4.2) при $d_0 = 3,2 \cdot 10^{-4}$ м; крапки – експериментальні значення

За результатами обробки експериментальних даних отримана залежність величини об'ємно-поверхневого діаметру крапель від відцентрового прискорення, яка наведена на рис.4.14.

Отримані експериментальні залежності об'ємно-поверхневого діаметру показують, що при збільшенні відцентрової сили вище 1000 м/с^2 осереднений діаметр краплі значно не змінюється.

Результати обробки експериментальних даних показують, що величини модального та об'ємно-поверхневого діаметрів можна представити у вигляді залежності

$$d_{32} = A \cdot d_{\text{мод}}; \quad (4.3)$$

В режимі від 1000 м/с^2 визначена величина $A = 1,07$, тобто для d_{32}

$$d_{32} = 1,07 \cdot d_{\text{мод}}. \quad (4.4)$$

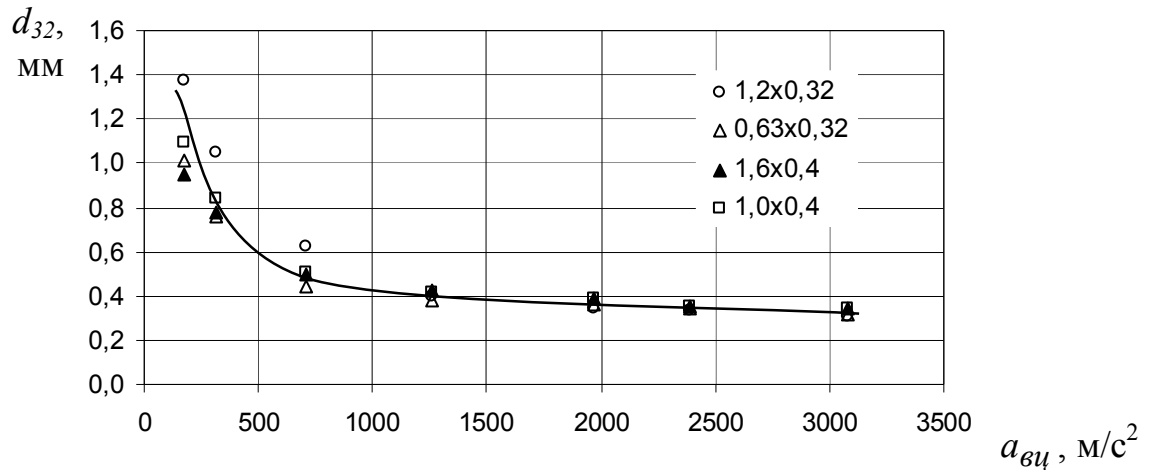


Рис. 4.14. Залежність d_{32} від відцентрового прискорення для різних сіток

З урахуванням отриманої залежності (4.2)

$$d_{32} = 0,845 \sqrt[3]{\frac{6 d_0 \sigma}{\rho_p \omega^2 r}}. \quad (4.5)$$

Співставлення розрахованих за залежністю (4.5) з експериментальними даними наведено на рис. 4.15. Відхилення даних розрахунку за (4.5) від результатів експерименту в дослідженому діапазоні (1000-3000 m/s^2) не перевищує $\pm 8\%$.

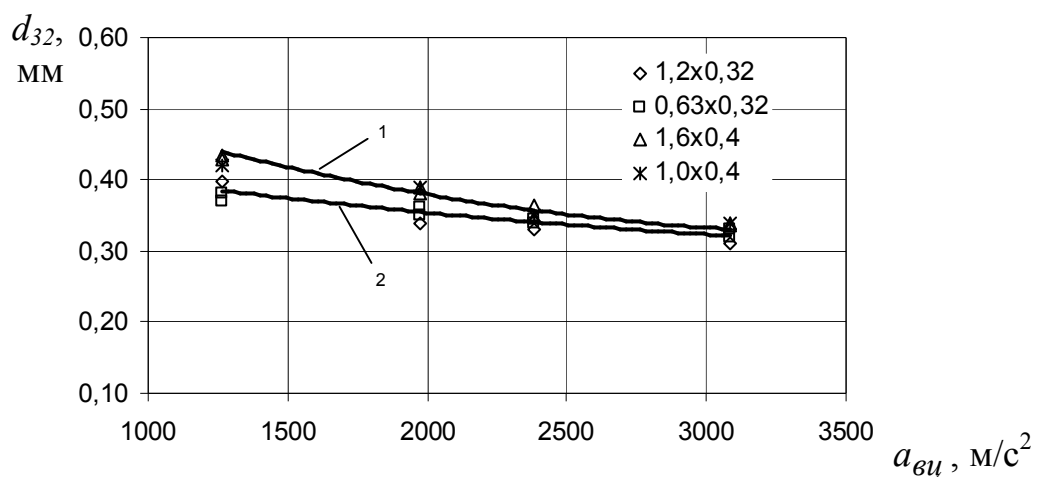


Рис. 4.15. Залежність d_{32} від відцентрового прискорення для різних типів сітки: 1 – розрахунок за (4.2) при $d_0 = 4 \cdot 10^{-4}$ м; 2 – розрахунок за (4.2) при $d_0 = 3,2 \cdot 10^{-4}$ м; крапки – експериментальні значення

4.3. Експериментальні дослідження масообмінних характеристик роботи ВМА

Експериментальні дослідження масообмінних характеристик відцентрового масообмінного апарата проводили на процесі десорбції. Дослідження проводили з застосуванням модельних сумішей аміак – вода та CO_2 – вода при десорбції в повітря. Результати оброблені у вигляді об'ємного коефіцієнта масовіддачі в газовій та рідкій фазі.

Вивчення характеристик проводили в діапазоні навантажень швидкостей газу 1,7 – 4,2 м/с (в перерахунку на середній перетин), швидкостей обертання 50 – 260 рад/с, щільності зрошення 0,033 – 0,133 м³/(м²·с).

Дослідження проводили на серії контактних пристроїв зі змінним кроком між елементами. Крок змінювали на ділянці в середині контактної пристрою (рис. 2.5) шляхом зміни в цій ділянці кількості контактних елементів. Тобто при порівнянні результатів, отриманих на різних пристроях із серії в однакових режимах роботи ВМА, взаємні відмінності обумовлені змінами в досліджуваній області.

4.3.1. Масовіддача в газовій фазі

Залежність коефіцієнту масовіддачі в газі (β_{yv}) від швидкості обертання ротора показує зростання ефективності масопереносу до значення $\omega \approx 100$ рад/с, далі залишається практично постійним (рис. 4.16) для контактних пристроїв з різним кроком між елементами.

Збільшення швидкості обертання спричиняє додаткову турбулізацію газу. Одночасно з цим зростання швидкості обертання призводить до зменшення розміру крапель рідини, зростання монодисперсності потоку, збільшення швидкості та кінетичної енергії крапель.

При швидкостях обертання ротора $\omega > 100$ рад/с відбувається вихід на сталий режим масовіддачі, подальше збільшення швидкості обертання практично не впливає на β_{yv} .

Збільшення швидкості газу призводить до практично лінійного зростання коефіцієнту масовіддачі (рис. 4.17). Зростання швидкості газу

призводить до більш активної внутрішньофазової турбулізації і відповідно до зростання ступеню масопереносу в середині фази.

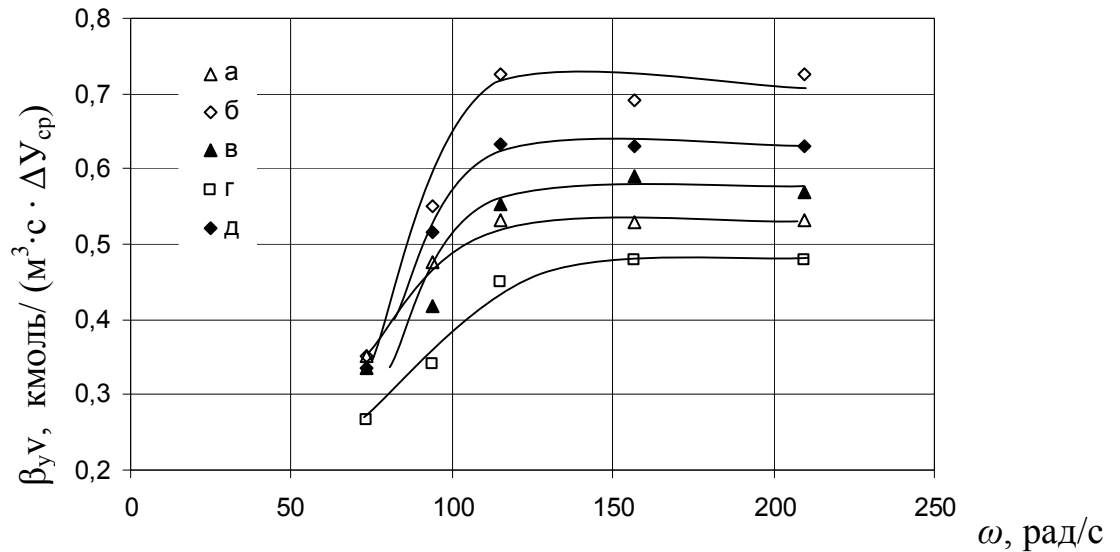


Рис. 4.16. Залежність β_{yV} від швидкості обертання для контактних пристроїв з кроком між елементами: а – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; б – $3 \cdot 10^{-3}$ м; в – $5 \cdot 10^{-3}$ м; г – $1 \cdot 10^{-2}$ м; д – $2 \cdot 10^{-2}$ м. Швидкість газу 1,74 м/с, щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

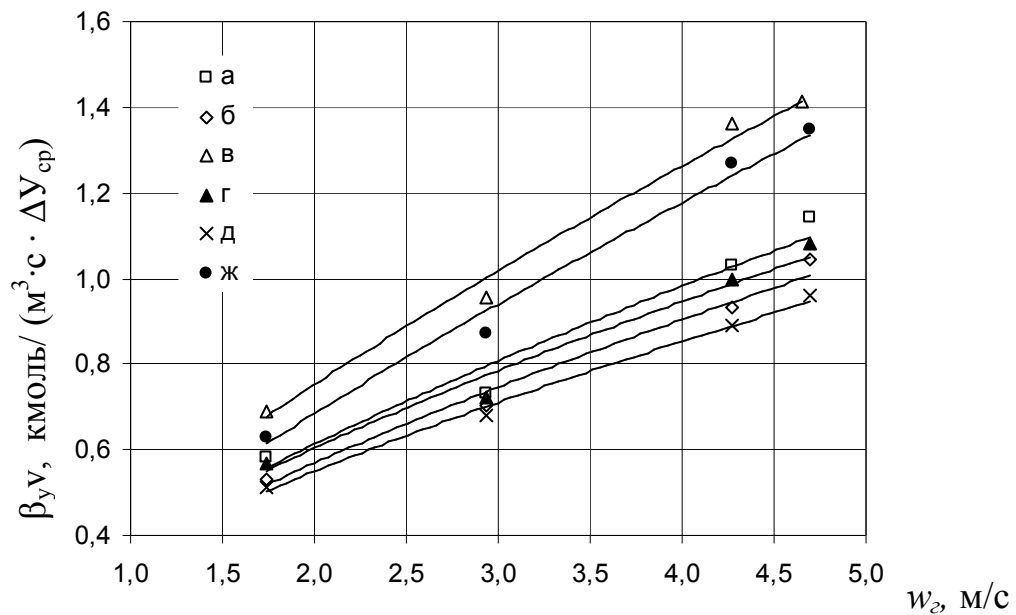


Рис. 4.17. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі від швидкості газу для контактних пристроїв з кроком між елементами: а – 0 м; б – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; в – $3 \cdot 10^{-3}$ м; г – $5 \cdot 10^{-3}$ м; д – $1 \cdot 10^{-2}$ м; ж – $2 \cdot 10^{-2}$ м. Швидкість обертання ротора 157 рад/с, щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Залежність коефіцієнту масовіддачі від щільності зрошення показує поступове його зростання зі збільшенням кількості рідини в контактному пристрої до величини $L \approx 0,09 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, потім спостерігається спад (рис. 4.18). Зростання обумовлене збільшенням кількості утримуваної рідини (КУР) та поверхні контакту фаз (ПКФ) при збільшенні L , це також підтверджується залежностями (3.48) та (3.49). Зі збільшенням поверхні контакту відповідно зростає ефективність масопереносу.

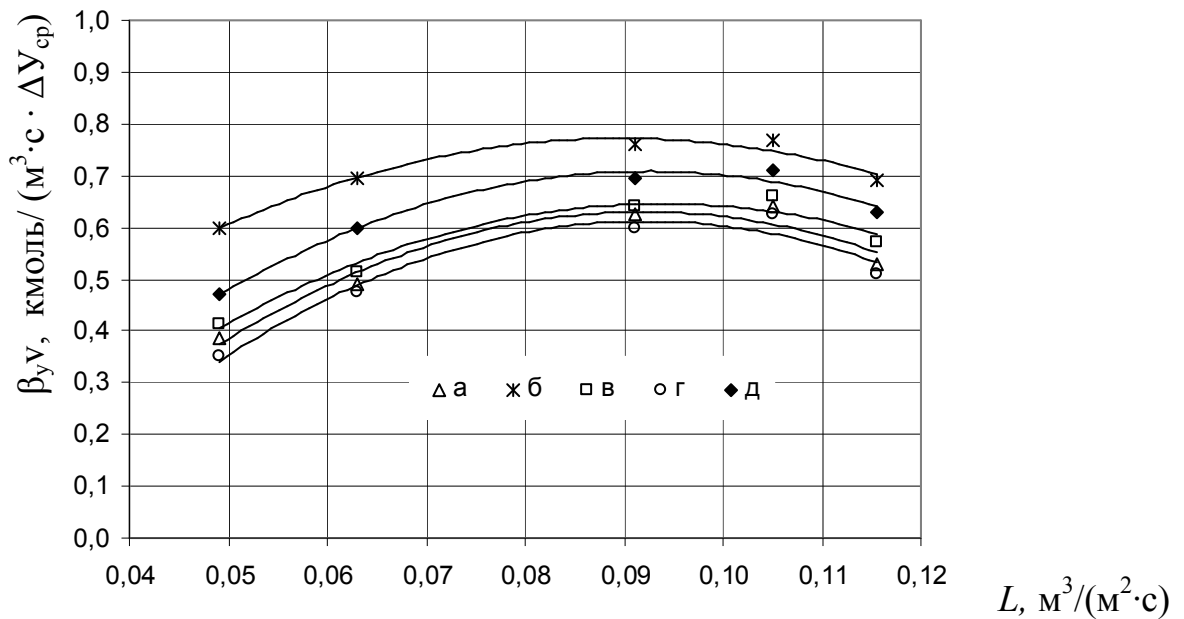


Рис. 4.18. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі від щільності зрошення для контактних пристроїв з кроком між елементами: а – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; б – $3 \cdot 10^{-3}$ м; в – $5 \cdot 10^{-3}$ м; г – $1 \cdot 10^{-2}$ м; д – $2 \cdot 10^{-2}$ м. Швидкість обертання ротора 157 рад/с, швидкість газу 1,74 м/с

Подальше збільшення витрати рідини призводить до зростання швидкості її витікання при подачі зі зрошувача. При цьому струмені при більшій швидкості проходять («пробивають») перші внутрішні кільцеві елементи, що викликає ефект поздовжнього перемішування на вхідній ділянці. Це негативно відображається на ефективності масопереносу і спостерігається відповідне зменшення β_{yV} при щільності зрошення більше $0,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

При порівнянні коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі в залежності від кроку між елементами бачимо, що максимальна ефективність роботи досягається при значенні $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 4.19). Залежність від кроку між елементами має три характерні ділянки. В діапазоні $\Delta r = (0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м величина β_{yv} практично залишається незмінною. При $\Delta r = 0$ контактний пристрій є пакетом щільно встановлених сітчастих елементів (аналог пористого тіла з набором каналів) і масопередача відбувається при контакті газу з плівкою рідини, що утворюється в його середині. Рух газу при цьому відбувається в каналах насадки, утворених прутками проволочи.

При $\Delta r = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м режим масовіддачі крапельний, при цьому рух газу супроводжується генерацією сітчастими елементами мікромасштабної турбулентності за рахунок наявності вільного простору між ними. Як видно на рис. 4.19 ці режими дають порівняно однакову ефективність масовіддачі в газі.

Діапазон $\Delta r = (1,5 - 8) \cdot 10^{-3}$ м має виражений максимум при $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Такий характер масовіддачі в газовій фазі визначається особливістю гідродинаміки газу при обтіканні сітчастого елемента. Приведені в роботах [104, 105] дані по гідродинаміці сіток показують, що при обтіканні сітки газовим потоком вона є генератором власної турбулентності. При чому максимум інтенсивності турбулентності сітки досягається на відстані декількох розмірів чарунки від сітки, після чого інтенсивність знижується. Саме розвиток до максимального значення і подальше виродження турбулентності обумовлюють характер зміни коефіцієнта масовіддачі β_{yv} в діапазоні $\Delta r = (1,5 - 8) \cdot 10^{-3}$ м.

При $\Delta r > 8 \cdot 10^{-3}$ м маємо постійне зростання ефективності масовіддачі зі збільшенням кроку між сітками. При подальшому збільшенні кроку між елементами зростає швидкість руху газу, що збільшує внутрішньофазову турбулізацію газу і відповідно призводить до зростання масовіддачі в газовій фазі.

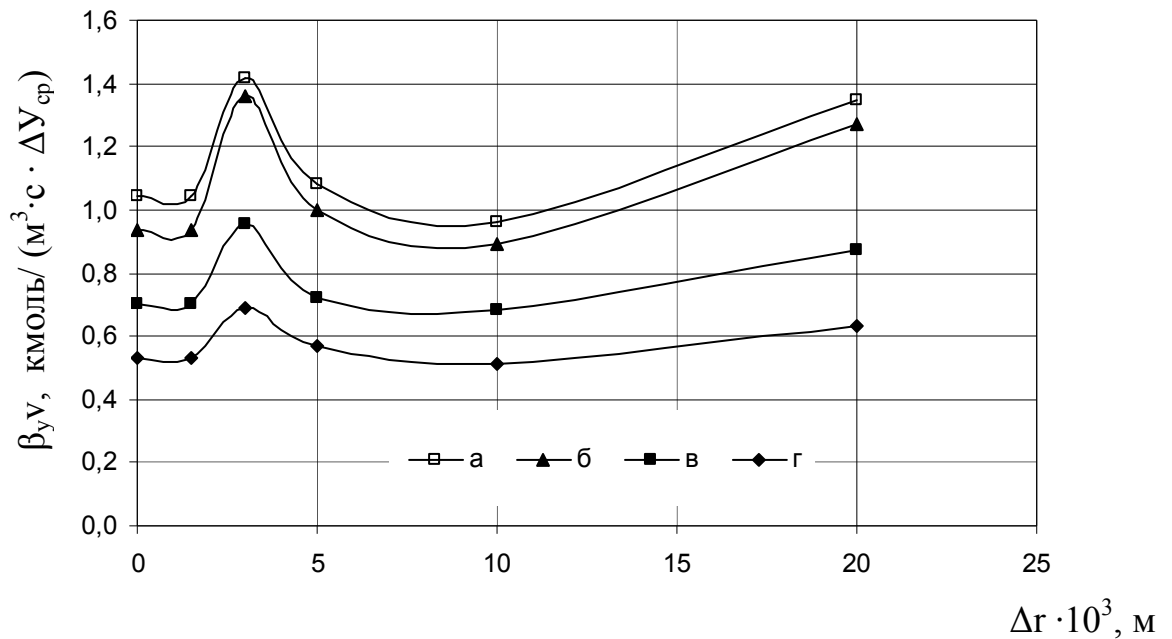


Рис. 4.19. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі від кроку між кільцевими елементами при швидкостях газу: а – 1,74 м/с; б – 2,94 м/с; в – 4,28 м/с; г – 4,7 м/с. Швидкість обертання 157 рад/с

4.3.2. Масовіддача в рідині

Залежність коефіцієнту масовіддачі в рідині від швидкості обертання (рис.4.20) показує поступове його зростання в діапазоні $\omega = 70 - 150$ рад/с, при $\omega > 150$ рад/с ефективність масовіддачі залишається практично постійною для контактних пристроїв з різним кроком між елементами.

Зростання на першому етапі обумовлене зменшенням розміру краплі при збільшенні діючої відцентрової сили, відповідно збільшенням питомої поверхні контакту фаз. На другому етапі ($\omega > 150$ рад/с) залежність розміру часток рідини від $\omega^2 r$ менш виражена, і поверхня контакту фаз росте більш повільно. Одночасно з цим зменшення діаметру краплі викликає затухання внутрішніх циркуляцій рідини в її середині. Таким чином, спільний вплив цих факторів призводить до практично постійного значення β_{xV} при швидкостях обертання $\omega > 150$ рад/с.

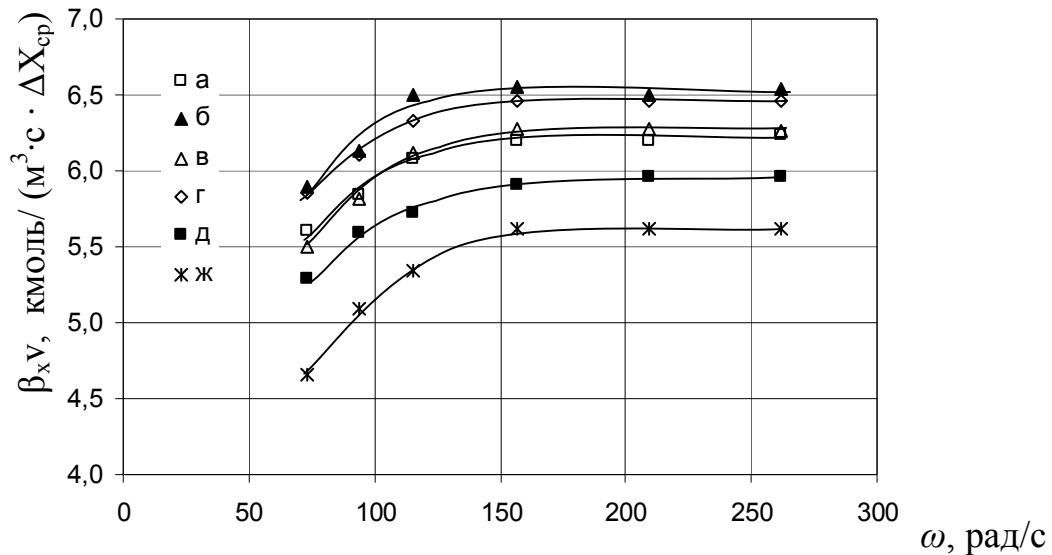


Рис. 4.20. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в рідині від швидкості обертання для контактних пристроїв з кроком між елементами: а – 0 м; б – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; в – $3 \cdot 10^{-3}$ м; г – $5 \cdot 10^{-3}$ м; д – $1 \cdot 10^{-2}$ м; ж – $2 \cdot 10^{-2}$ м. Швидкість газу 1,74 м/с, щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

При збільшенні швидкості газу ефективність масовіддачі зростає за характером, близьким до лінійного (рис. 4.21). Збільшення швидкості газу і відповідно відносної швидкості руху фаз призводить до зростання міжфазового тертя і дотичних напруг, що діють на краплі в контактному пристрої. Це сприяє активізації внутрішньокраплинних циркуляцій і зростанню ефективності масовіддачі в рідині.

Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в рідині від щільності зрошення контактної пристрою наведена на рис. 4.22. Отримані дані показують, що ефективність масовіддачі при збільшенні щільності зрошення зростає. Збільшення витрати рідини призводить до росту ступеня масовіддачі через зростання кількості рідини в апараті й відповідно поверхні контакту фаз, що впливає на кількість перенесеної в одиниці об'єму масі.

Залежність коефіцієнту масовіддачі в рідині від кроку між елементами (рис. 4.23) показує, що достатньо висока ефективність масовіддачі спостерігається в діапазоні $\Delta r = (0 - 5) \cdot 10^{-3}$ м, при значеннях кроку більше $5 \cdot 10^{-3}$ м величина $\beta_x v$ падає.

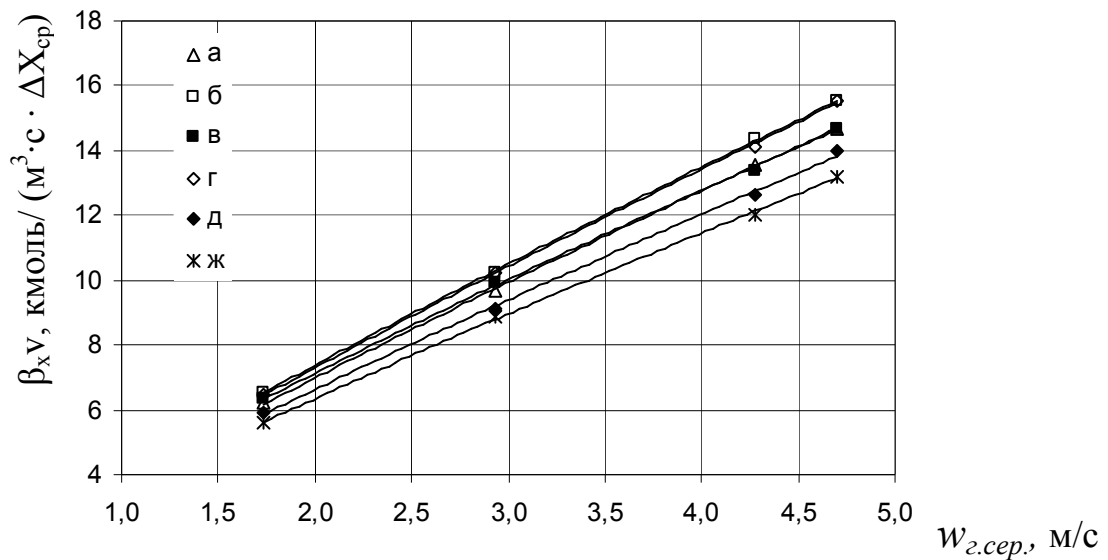


Рис. 4.21. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в рідині від швидкості газу для контактних пристроїв з кроком між елементами: а – 0 м; б – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; в – $3 \cdot 10^{-3}$ м; г – $5 \cdot 10^{-3}$ м; д – $1 \cdot 10^{-2}$ м; ж – $2 \cdot 10^{-2}$ м. Швидкість обертання ротора 157 рад/с, щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

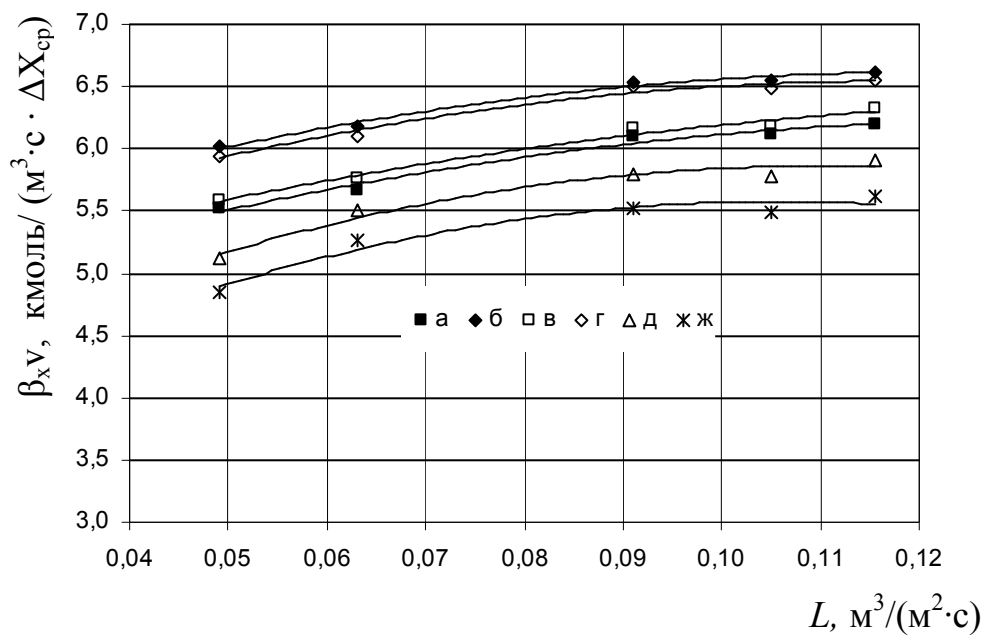


Рис. 4.22. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в рідині від щільності зрошення для контактних пристроїв з кроком між елементами: а – 0 м; б – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; в – $3 \cdot 10^{-3}$ м; г – $5 \cdot 10^{-3}$ м; д – $1 \cdot 10^{-2}$ м; ж – $2 \cdot 10^{-2}$ м. Швидкість обертання ротора 157 рад/с. Швидкість газу 1,74 м/с

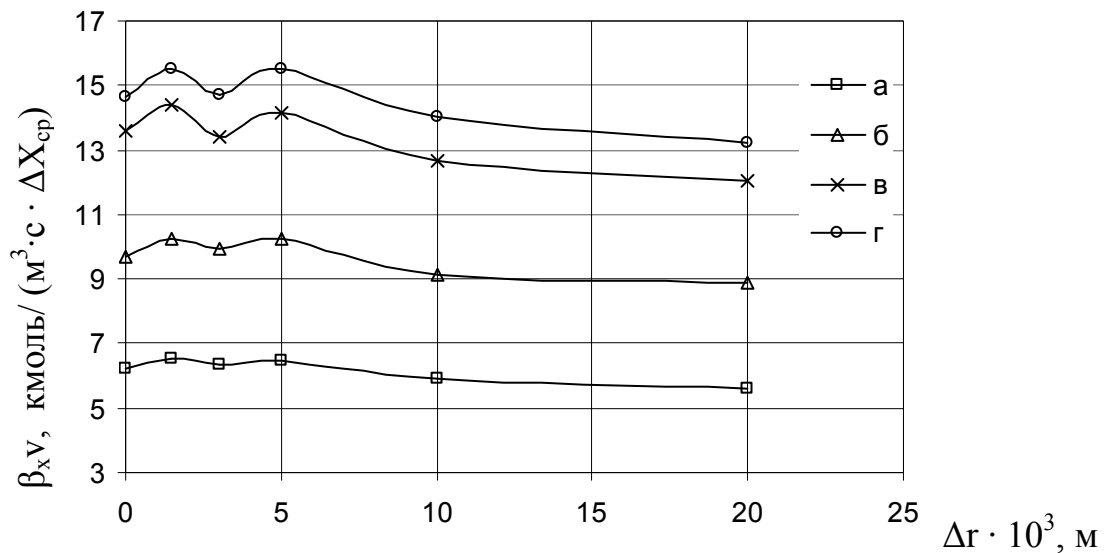


Рис. 4.23. Залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в рідині від кроку між кільцевими елементами при швидкостях газу: а – 1,74 м/с; б – 2,46 м/с; в – 2,94 м/с; г – 3,25 м/с. Швидкість обертання 157 рад/с

Це обумовлено тим, що при невеликих значеннях кроку оновлення дисперсного потоку відбувається частіше і краплі рідини постійно знаходяться в нестационарному режимі. Відомо [21, 25], що в нестационарних умовах ефективність процесів масопереносу вища за стаціонарні.

При збільшенні кроку між елементами зростає час існування краплі. При умові, коли час існування більший за час релаксації краплі, спостерігається зниження ефективності масовіддачі. В даних умовах гранична величина кроку між елементами, що обмежує діапазон порівняно високої ефективності роботи апарата, знаходиться на рівні $\Delta r = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

4.4. Оброблення та узагальнення експериментальних даних

Порівняльні результати масообмінних характеристик ВМА в газовій фазі в залежності від кроку між елементами контактної пристрою показують, що найбільша ефективність досягається при $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м (рис.4.24). Для масообміну при лімітуючому опорі в рідині контактний пристрій з величиною $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м також має достатньо високі масообмінні показники (рис.4.27). Виходячи з отриманих результатів найбільш

оптимальною величиною кроку, при якій досягаються достатньо висока ефективність при опорі масопереносу в будь-якій з фаз, є крок $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Тому узагальнення даних експериментів проведене для контактної пристрою з кроком $3 \cdot 10^{-3}$ м між елементами.

4.4.1. Перепад тиску в ВМА

Для визначення гідравлічного опору ділянки між контактними елементами за (3.22) необхідно мати залежності для розрахунку коефіцієнтів k_{ex} , k_{φ} та λ , які визначені експериментально. Для коефіцієнту k_{ex} в результаті обробки експериментальних даних отримано:

$$k_{ex} = 3,52 \left(\frac{wR}{\omega R} \right)^{0,6} \quad \text{при} \quad \left(\frac{wR}{\omega R} \right) < 0,178, \quad (4.6)$$

$$k_{ex} = 7,7 \left(\frac{wR}{\omega R} \right)^{1,06} \quad \text{при} \quad \left(\frac{wR}{\omega R} \right) > 0,178. \quad (4.7)$$

Для коефіцієнту, що враховує зміну колової швидкості при обтіканні контактної елементу k_{φ} залежності мають вигляд:

$$k_{\varphi} = 109 \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right)^{2,34} \quad \text{при} \quad \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) < 0,11, \quad (4.8)$$

$$k_{\varphi} = 1,77 \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right)^{0,51} \quad \text{при} \quad 0,11 < \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) < 0,2, \quad (4.9)$$

$$k_{\varphi} = \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right)^{0,05} \quad \text{при} \quad 0,2 < \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) < 1,11, \quad (4.10)$$

$$k_{\varphi} = 1 \text{ при } \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) > 1,11. \quad (4.11)$$

Для коефіцієнту λ отримана залежність для робочого діапазону швидкостей обертання апарата $50 < \omega < 250$

$$\lambda = 3,4 \left(\frac{w_R}{\omega R} \right) + 1,12. \quad (4.12)$$

Кореляція експериментальних та розрахункових даних, отриманих з урахуванням рівнянь для коефіцієнтів k_{ex} , k_{φ} та λ приведена на рис. 4.24. Відхилення розрахункових даних від експериментальних не перевищує 10%.

Для визначення повного перепаду тиску апарата за (3.23) необхідно визначення фактору зрошення f_L , що враховує вплив рідини на ΔP . За результатами обробки експериментальних даних отримана залежність для робочого режиму швидкостей обертання $\omega > 150$ рад/с у вигляді

$$f_L = 1,97 \cdot Re^{0,14} Fr_{вц}^{0,12}, \quad (4.13)$$

де $Fr_{вц} = a_{вц} / g$ – відцентровий критерій Фруда.

Швидкість газу в критерії Re визначається як середньоінтегральна від r_0 до R за формулою

$$w_2 = w_0 \frac{r_0}{R - r_0} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (4.14)$$

Як видно, відхилення розрахункових значень від результатів експерименту не перевищує 10% у всьому дослідженому діапазоні.

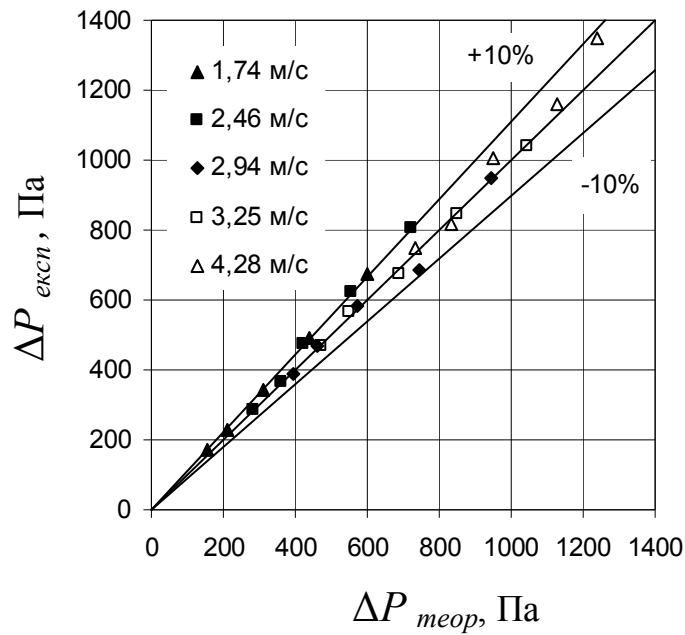


Рис. 4.24. Співставлення теоретичних та експериментальних даних для перепаду тиску незрошуваного апарата при різних швидкостях газу

Порівняння результатів розрахунку повної величини перепаду тиску за (3.23) з урахуванням (4.6) – (4.13) та експерименту приведені на рис. 4.25.

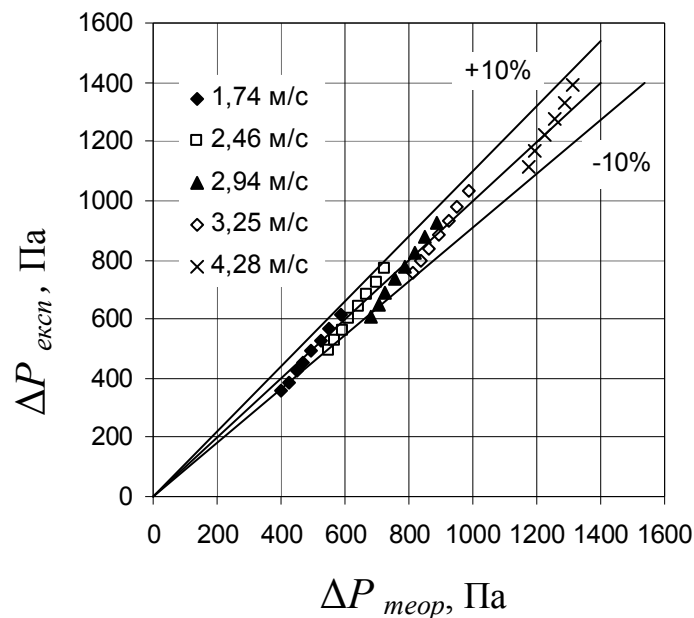


Рис.4.25. Співставлення теоретичних та експериментальних даних перепаду тиску в ВМА для різних швидкостей газу

4.4.2. Масообмінні характеристики роботи апарата

Результати узагальнені у вигляді залежності дифузійного критерію Нусельта від числа Рейнольдса та навантаження по фазам L/G.

При лімітуючому опорі масопереносу в газовій фазі залежність має вигляд

$$Nu_G = 0,038 Re^{1,09} \left(\frac{L}{G} \right)^{0,13} . \quad (4.15)$$

При опорі масопередачі, зосередженому в рідині

$$Nu_L = 720 Re^{0,92} \left(\frac{L}{G} \right)^{0,2} . \quad (4.16)$$

Порівняння розрахованих за залежностями (4.15) та (4.16) значень з результатами експерименту наведене на рис. 4.26 та 4.27, відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищує 12%.

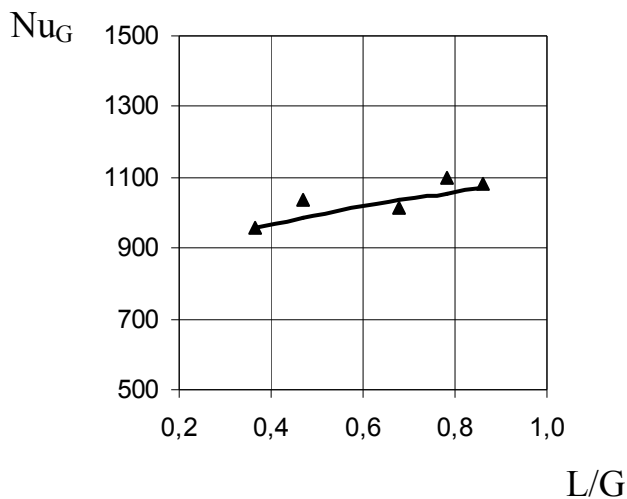


Рис. 4.26. Залежність критерію Nu_G від L/G. Крапки – експериментальні значення, лінія – розрахунок за (4.15)

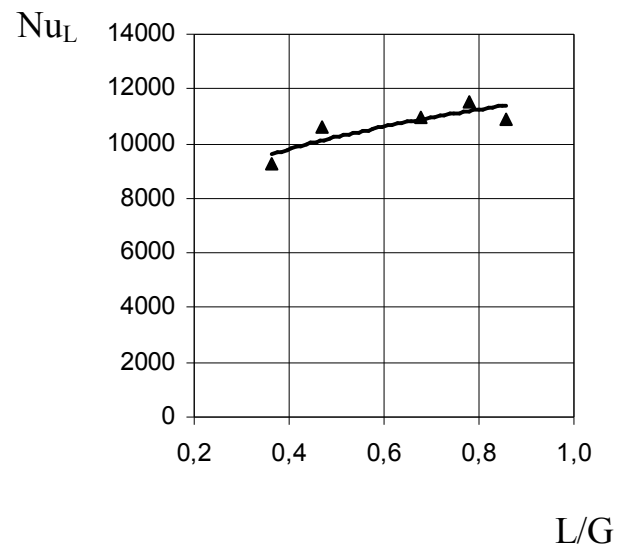


Рис. 4.27. Залежність критерію Nu_L від L/G. Крапки – експериментальні значення, лінія – розрахунок за (4.16)

Проведений порівняльний аналіз ефективності роботи відцентрового масообмінного апарата з розробленою конструкцією контактної пристрою з

результатами досліджень інших авторів приведені на рис. 4.28 та 4.29. Результати приведені за величиною коефіцієнта масовіддачі в газовій та рідкій фазах в залежності від навантаження по фазам (L/G). Для порівняння обрані дані по масовіддачі в відцентрових апаратах аналогічної конструкції з іншими контактними пристроями, наведені в літературі.

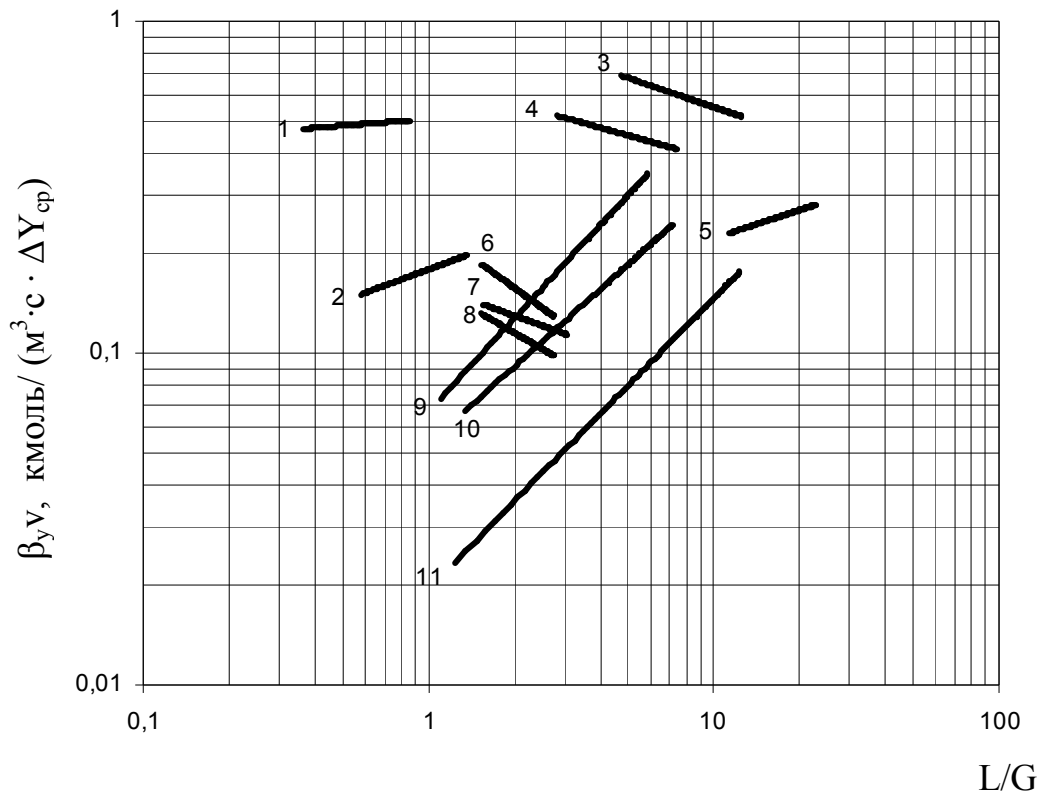


Рис. 4.28. Порівняльна залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі від співвідношення навантаження по фазам для відцентрових масообмінних апаратів з різними контактними пристроями: 1, 2 – дані цієї роботи для $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м та $1 \cdot 10^{-2}$ м відповідно при 157 рад/с; 3, 4 – дані [116] при 178 рад/с; 5 – дані [117] при 157 рад/с; 6 – дані [6] при 419 рад/с; 7, 8 – дані [4] при 419 рад/с; 9, 10, 11 – дані [19] при 262 рад/с

Як видно з рис. 4.28 ВМА з розробленою конструкцією контактного пристрою має порівняно високі масообмінні характеристики для сумішей з опором масопереносу в газовій фазі.

Порівняння коефіцієнту масовіддачі в рідині приведено на рис. 4.29.

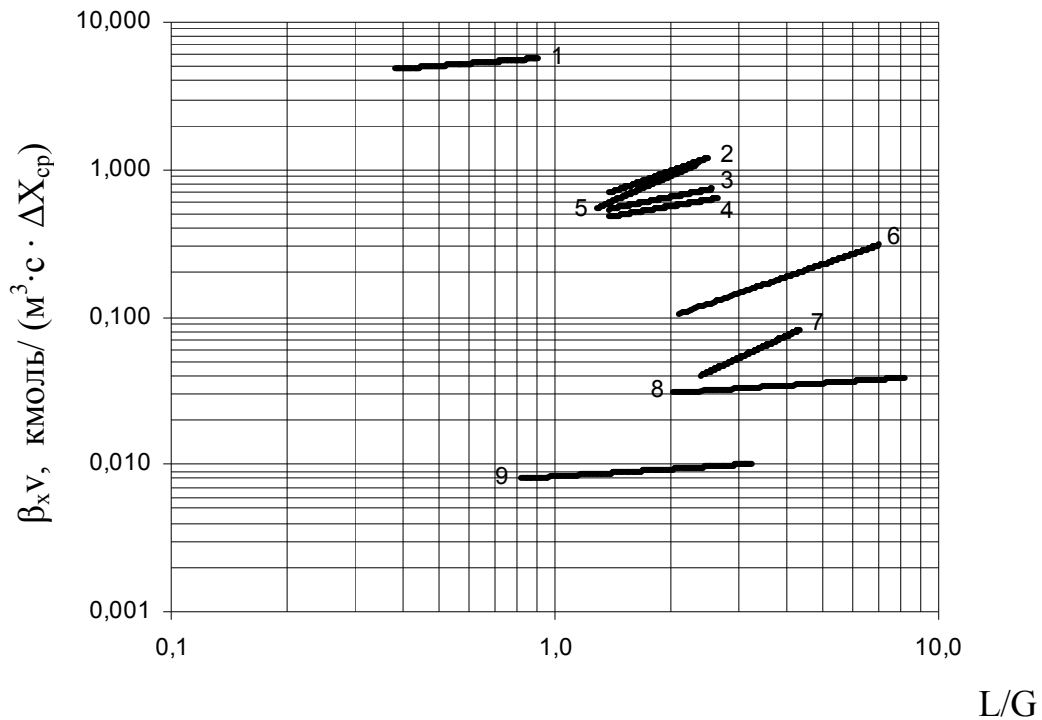


Рис. 4.29. Порівняльна залежність об'ємного коефіцієнту масовіддачі в рідині від співвідношення навантаження по фазам для відцентрових масообмінних апаратів з різними контактними пристроями: 1 – дані цієї роботи для $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м при 157 рад/с; 2, 3, 4 – дані [4] при 419 рад/с; 5 – дані [6] при 419 рад/с; 6 – дані [18] при 188 рад/с; 7 – дані [15] при 157 рад/с; 8, 9 – дані [116] при 167 рад/с

Аналіз коефіцієнту масопередачі в рідині на рис. 4.29 показує, що розроблена конструкція контактної пристрою має найбільше значення β_{yv} серед відомих аналогів.

4.5. Висновки до четвертого розділу

В результаті проведених експериментальних досліджень гідродинамічних та масообмінних характеристик роботи відцентрового масообмінного апарата:

- встановлено адекватність розробленої математичної моделі для визначення дисперсних характеристик рідини в контактному пристрої ВМА, експериментально отримані необхідні коефіцієнти;

- визначені залежності дисперсного розподілу рідкої фази від режимних параметрів та конструктивних характеристик контактного пристрою;

- доведено адекватність розробленої математичної моделі гідродинаміки газової фази, визначені необхідні коефіцієнти. Результати розрахунків за отриманими залежностями показують достатньо високе співпадіння з експериментальними даними (відхилення в межах 10%);

- отримано масообмінні показники роботи апарата з дослідженим типом контактної пристрою в залежності від режимів роботи та конструктивних особливостей контактної пристрою;

- за результатами теоретичних та експериментальних досліджень визначена оптимальна величина кроку між елементами – $3 \cdot 10^{-3}$ м, при якій досягаються порівняно високі показники роботи апарата на робочих сумішах з опором масопереносу в будь-якій з фаз.

Основні результати розділу опубліковані в працях [76, 91, 114, 115].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ АПАРАТА

5.1. Стан питання

Проблема екологічного стану нашої держави гостро стоїть останні роки, сьогодишню екологічну ситуацію на Україні часто характеризують як кризову. Однією з екологічних проблем є утворення та накопичення відходів.

Щорічно на Україні за оцінками Ради вивчення продуктивних сил НАН України (в період з 2000 до 2007 роки) обсяг утворення відходів склав 650–750 млн. т. Загальний обсяг вже накопичених відходів на цей час оцінено в 35 млрд. т. [118].

Однією з основних проблем в сфері поводження з відходами є переважання застарілих технологій основних виробництв, недостатня повнота використання сировини, низька ефективність обладнання, а також практично відсутність переробки відходів безпосередньо в містах їх утворення. В тому числі це стосується відходів, що утворюються у відносно невеликих кількостях і встановлення ліній чи обладнання для їх переробки є низькорентабельним з високими капітальними витратами [119].

Шосткинське підприємство ТОВ «Шостка-Хімпродукт» є хімічним виробництвом, що випускає широкий спектр продукції.

Одним з продуктів є ацетат етиленгліколю (АЦЕГ). Він використовується в ливарному виробництві при виготовленні формувальних та стрижневих сумішей в якості затверджувача (при змішуванні з рідким склом). АЦЕГ фактично є сумішшю моноацетату та діацетату етиленгліколю, а також домішок пропіонату етиленгліколю, органічних кислот та води і в залежності від співвідношення ефірів в кінцевій суміші випускається декілька марок.

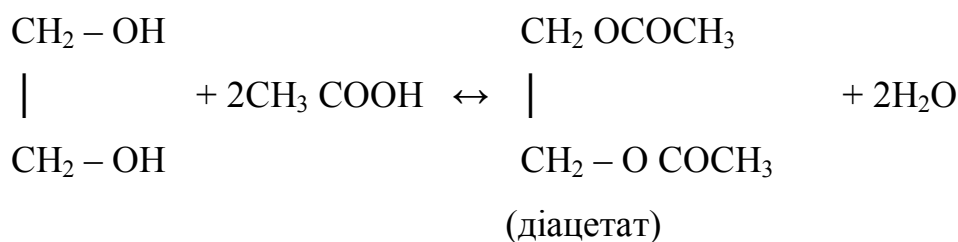
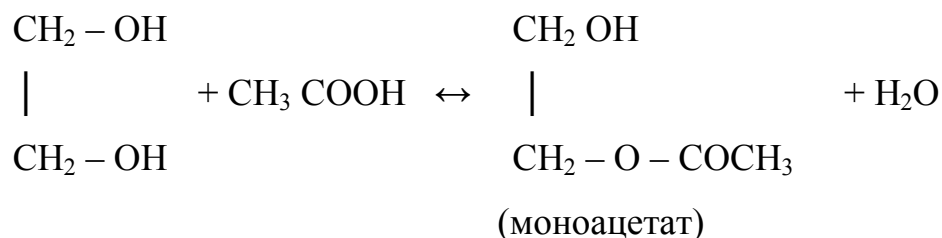
Виробництво АЦЕГ включає наступні технологічні операції:

- приймання сировини;

- змішування компонентів для подальшого виробництва;
- ацетилювання;
- отримання готового продукту;
- відпуск готового продукту споживачу.

Технологічний процес отримання затверджувача оснований на реакції етерифікації етиленгліколю і оцтової кислоти з одночасним виведенням реакційної води із системи.

Синтез проводиться в надлишку оцтової кислоти до трикратного, при атмосферному тиску і під вакуумом і температурі 105-135⁰С за реакціями:



Цільовим продуктом етерифікації являється суміш складних ефірів (моно- та діацетату етиленгліколю) у заданому співвідношенні. Ацетати етиленгліколя представляють собою маслянисту речовину з низькою летючістю. Реакція етерифікації являється зворотною і проходить практично без поглинання тепла, тобто має тепловий ефект, близький до нуля.

Етиленгліколь і оцтова кислота із ємностей-сховищ через мірники самопливом поступають у реактор синтезу. При перемішуванні сировини через завантажувальний люк в реактор завантажується каталізатор.

Реакційна маса у реакторі синтезу нагрівається до заданої температури ($+100^{\circ}\text{C}$). Синтез проходить з безперервним обігрівом реактора протягом 45-48 годин.

Для зміщення рівноваги в бік утворення продуктів реакції, реакційну воду необхідно виводити із зони реакції. В процесі синтезу реакційна вода і надлишок оцтової кислоти відводяться із реактора в холодильник, а потім в збірник, зі збірника самопливом зливається в ємність. Суміш води та оцтової кислоти, що накопичується в ємності, має концентрацію 30-35% (мас.) і фактично є відходом виробництва. За рік на ТОВ «Шостка-Хімпродукт» утворюється близько 250 т такої суміші.

Оцтова кислота при цьому є сировиною для отримання АЦЕГ, необхідна концентрація для використання в процесі – 70-99%.

Таким чином, постає задача сконцентрувати кислоту для можливості її застосування в виробничому циклі, одночасно вирішується проблема утилізації відходу та повернення в виробництво ресурсного компоненту.

На теперішній час проблема для ТОВ «Шостка-Хімпродукт» є актуальною. Накопичена суміш відвозиться на перегонку до іншого підприємства, що несе за собою додаткові витрати та складає ряд організаційно-технологічних незручностей. Встановлення власної ректифікаційної колони є недоцільним через відносно невеликі обсяги утворюваної речовини, які не дозволяють повністю завантажити колонне обладнання на безперервний цикл роботи.

5.2. Схема дослідно-промислової установки

Нами було запропоноване рішення для утилізації відходу виробництва АЦЕГ та повернення ресурсно-цінного компоненту в технологічний процес. Ректифікацію суміші оцтова кислота-вода пропонується проводити за допомогою відцентрового масообмінного обладнання.

Для проведення досліджень в промислових умовах була розроблена та випробувана установка, до складу якої входять два відцентрові масообмінні

апарати. Один апарат такого типу замінює одну половину повної колони (відгінну або концентраційну), тому для проведення процесу ректифікації необхідно два апарати.

Запропоновані апарати мають такі геометричні розміри контактних пристроїв:

- відгінний ВМА: внутрішній діаметр ротора 0,1 м, зовнішній діаметр 0,4 м, ширина ротора 0,03 м, $N_{m.m.} \approx 10$;

- концентраційний ВМА: внутрішній діаметр ротора 0,04 м, зовнішній діаметр 0,16 м, ширина ротора 0,03 мм, $N_{m.m.} \approx 4$.

Контактний пристрій конструктивно складається з вісесиметричних кільцевих елементів, виготовлених з металевої сітки 1,2x0,32 і встановлених на відстані 5 мм один від одного.

Установка працює наступним чином. Вихідна суміш зі збірника, змішуючись з рідиною, що виходить з концентраційного ВМА, подається на зрошення відгінного апарата. Парова фаза, що надходить у відгінний апарат, утворюється при випаровуванні концентрованої оцтової кислоти в кубі-випарнику. Після контакту рідина, що утворилася, виводиться з низу ВМА, це сконцентрована оцтова кислота з концентрацією 95-99%. Пара надходить до другого, концентраційного, апарата.

З відгінного апарата виходить концентрована оцтова кислота. Частина її направляється до випарника, а друга – до ємностей-мірників і повертається у основне виробництво.

На зрошення концентраційного апарата подається сконденсована вода. Рідина, що виходить з концентраційного апарата, змішується з вихідною сумішшю та направляється на зрошення відгінного ВМА, пара надходить до конденсатора, отриманий дистилат розділяється на два потоки. Один з них направляється на зрошення концентраційного ВМА, інший відводиться з системи в збірник (рис. 5.1).

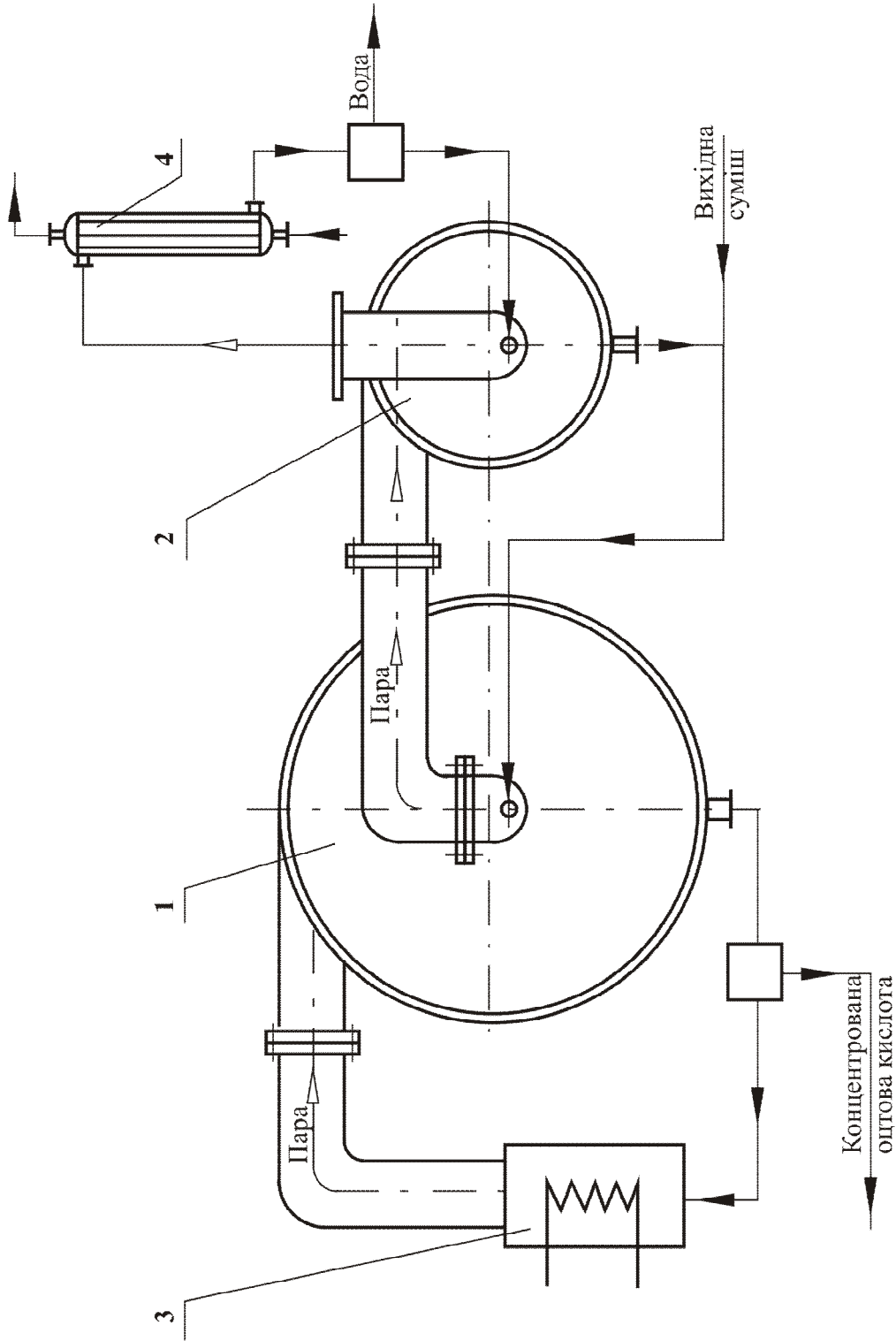


Рис. 5.1. Принципова схема дослідно-промислової установки для ректифікації оцтової кислоти:

1 – відгінний апарат; 2 – концентраційний апарат; 3 – випарний куб; 4 – конденсатор. Зафарбовані стрілки на схемі показують напрямки потоків рідини, порожні – потоків пари

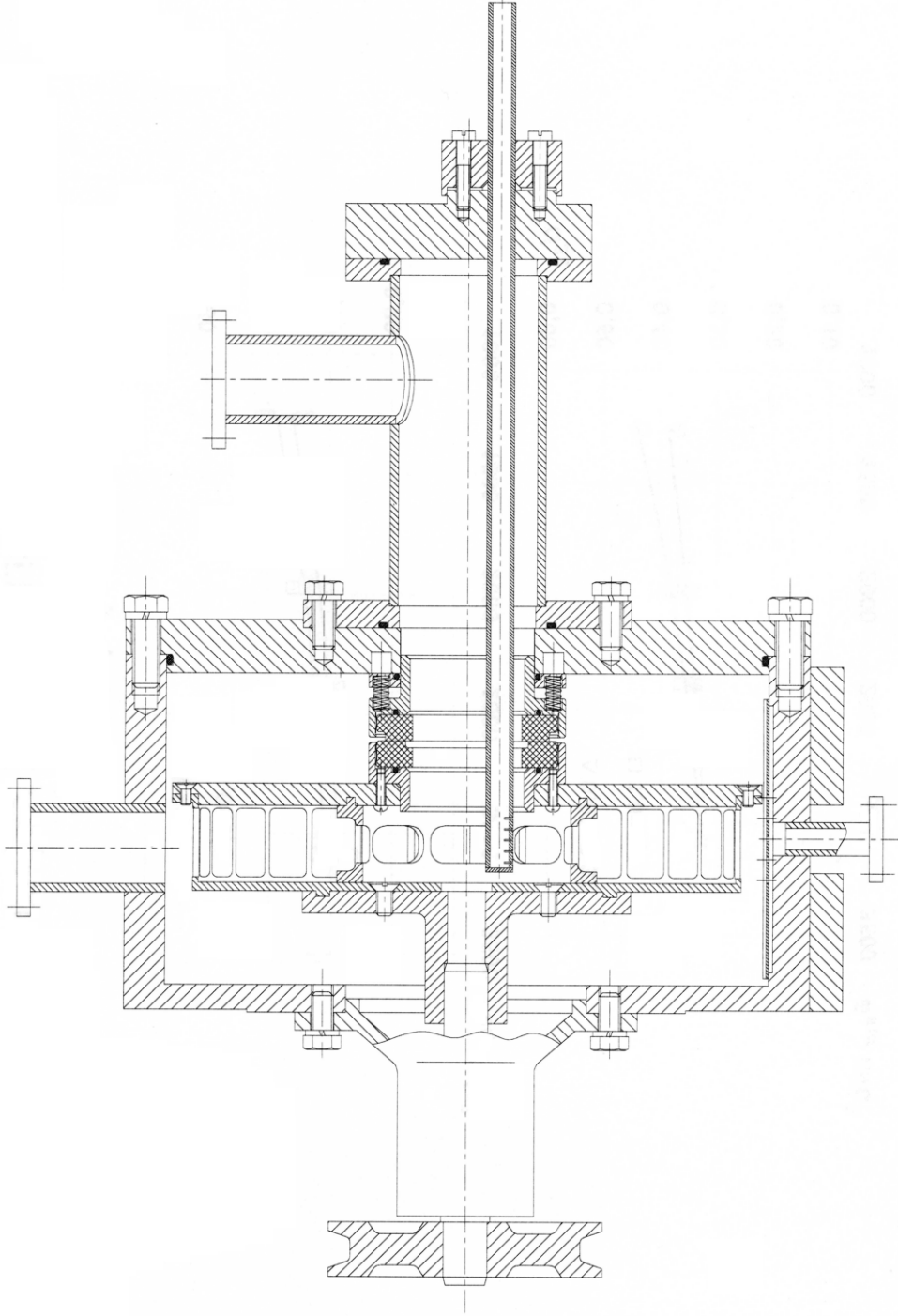


Рис. 5.2. Конструкція відцентрового масообмінного апарата дослідно - промислової установки концентрування оцтової кислоти

5.3. Методика проведення досліджень

Перед першим запуском змонтований стенд був промитий, перевірені та відтаровані вимірювальні прилади, проведені гідравлічні іспити.

При проведенні досліджень обладнання працювало при номінальному навантаженні, після досягнення заданого режиму навантаження утримувалося протягом години, після чого проводилося вимірювання параметрів та відбір проб. При зміні режиму витримувався вказаний часовий проміжок до наступного відбору проб. Режим роботи установки характеризувався стійкістю основних параметрів в часі: температури пари та рідини, витрати рідини, що подавалися на зрошення, тиску пари. Величина відхилень параметрів процесу, які контролювалися, протягом проведення досліджень не перевищувала 2%.

В процесі досліджень проводилося визначення вмісту оцтової кислоти у вхідній суміші, вихідному конденсаті та кубовому залишку, вимірювання витрати та температури рідин, що подаються на зрошення обох апаратів, гідравлічний опір апаратів та потужність, що споживають при роботі електронагрівачі випарного кубу.

Концентрацію оцтової кислоти визначали вимірюванням щільності за допомогою ареометрів. Після відбору проби охолоджувались до 20°C після чого визначалася густина рідини. Залежність концентрації від густини розчинів оцтової кислоти взяті за [120]. При необхідності в окремих випадках концентрація перевірялася титруванням 1Н розчином NaOH. Для цього відбирали певний об'єм проби та титрували розчином NaOH в присутності індикатору фенолфталеїну до появи блідо-рожевого забарвлення. Концентрацію оцтової кислоти (г/л) при цьому розраховували за формулою

$$\bar{C} = \frac{V_{NaOH} \cdot K \cdot 1000}{V_{np}}, \quad (5.1)$$

де V_{NaOH} - об'єм гідроксиду натрію, витрачений на титрування, мл;

$K = 0,06$ - питома маса оцтової кислоти, що реагує з 1 мл 1Н розчину гідроксиду натрію, г;

V_{np} - об'єм проби, відібраної на аналіз, мл.

5.4. Результати іспитів ВМА в промислових умовах

Проведені дослідно-промислові випробування показали стабільність роботи відцентрових масообмінних апаратів протягом тривалого часу та забезпечення високої ефективності проведення процесу.

Іспити проводилися в наступних умовах: навантаження установки по вихідній суміші відповідає середньогодинному її накопиченню в умовах підприємства ТОВ «Шостка-Хімпродукт» і складало $6,9 \cdot 10^{-3} - 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Витрата пари концентрованої оцтової кислоти, що подавалася в відгінний апарат – $0,022 \text{ м}^3/\text{с}$, витрата води на зрошення концентраційного апарата складала $9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. При таких умовах вихід концентрованої кислоти (99% мас.) склав $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Перепад тиску апаратів в умовах іспитів був у межах: для відгінного РРА 500-750 Па, для концентраційного 350-550 Па.

При роботі установки проводилися дослідження режимів процесу для визначення оптимальних його параметрів. Важливими параметрами ректифікаційного процесу є флегмове число (R), парове число (П) та співвідношення L/G. Сьогодні напрацьовані рекомендації для їх визначення в різних типах ректифікаційних колон, але для запропонованої схеми з відцентрових апаратів це потребує окремого дослідження. З метою визначення рекомендованих параметрів роботи даної ректифікаційної установки визначався їх вплив на якісні та кількісні показники процесу, а також на його енерговитрати.

З метою отримання рекомендованих величин флегмового та парового числа і відповідно відношення L/G, експериментально досліджували їх вплив на характеристики отримуваних продуктів перегонки. В першій серії експериментів змінювали величину флегмового числа при незмінній витраті пари (потужності випарного кубу). В другій серії залишали незмінним

подачу флегми і змінювали потужність випарного кубу. В обох серіях досліджень контролювали концентрації та кількість продуктів ректифікації.

Отримані результати узагальнені у вигляді графічних залежностей. На рис. 5.3 – 5.6 наведені залежності кількісних та якісних показників процесу від флегмового числа (перша серія експериментів).

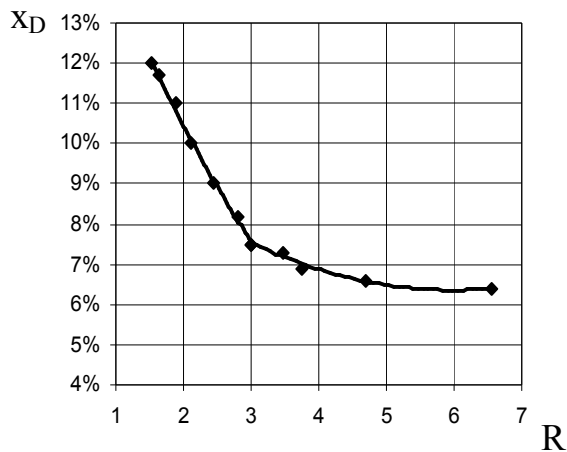


Рис. 5.3. Залежність концентрації кислоти в дистилаті від флегмового числа

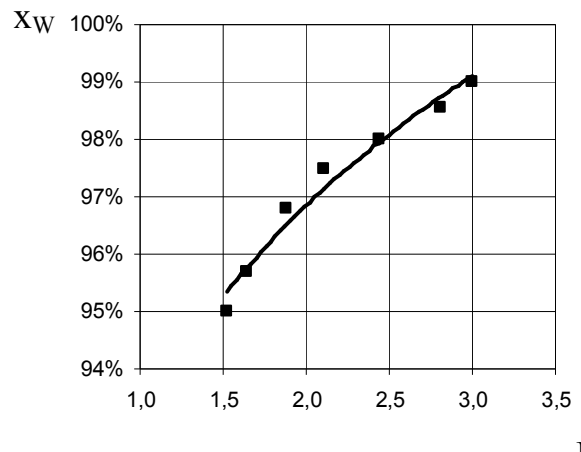


Рис. 5.4. Залежність концентрації кислоти в кубовому залишку від флегмового числа

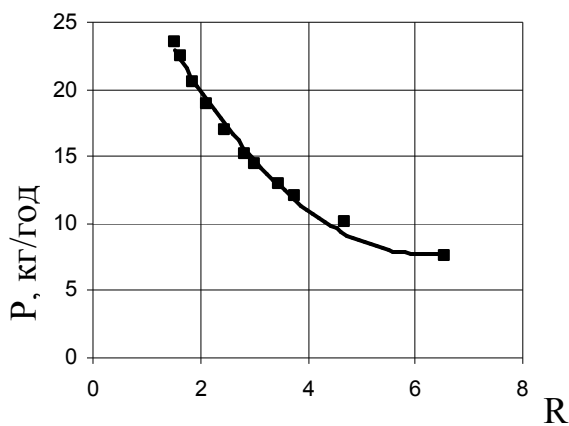


Рис. 5.5. Залежність кількості дистилату від флегмового числа

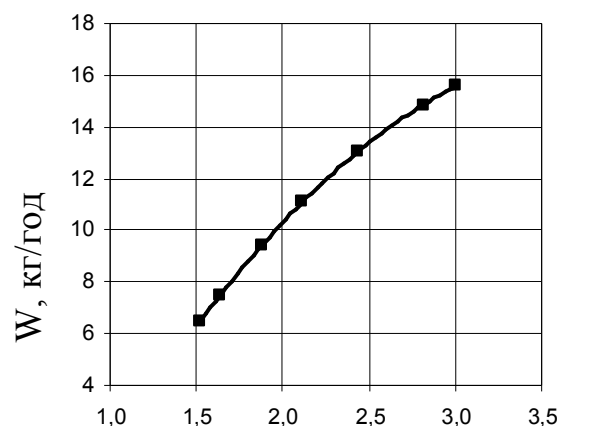


Рис. 5.6. Залежність кількості кубового залишку від флегмового числа

Збільшення флегмового числа призводить до підвищення якості розділення внаслідок збільшення рушійної сили процесу, спостерігається

зростання концентрації кислоти в кубовому залишку та зменшення її в дистилаті. Кількісні показники процесу змінюються по різному. В дистилаті разом з підвищенням його якості внаслідок росту R , кількісний показник зменшується (рис. 5.5). Кількість кубового залишку зі зростанням флегмового числа навпаки збільшується (рис. 5.6).

Аналіз отриманих даних дозволяє встановити рекомендоване флегмове число для даної системи на рівні $R=3$.

Результати другої серії дослідів (залежності від парового числа) наведені на рис. 5.7 – 5.10.

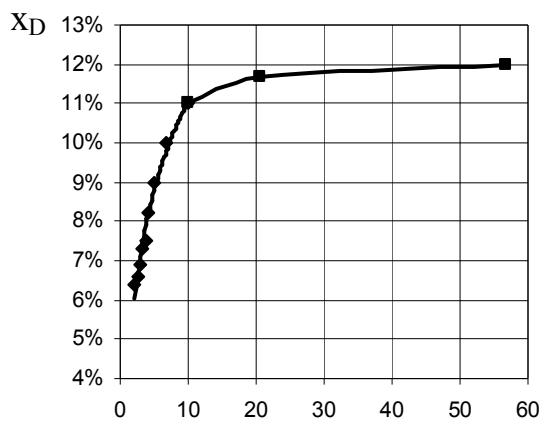


Рис. 5.7. Залежність концентрації кислоти в дистилаті від парового числа

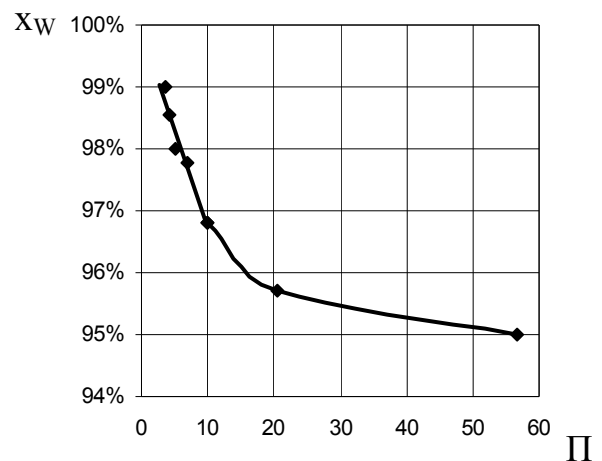


Рис. 5.8. Залежність концентрації кислоти в кубовому залишку від парового числа

Збільшення парового числа призводить до зростання концентрації кислоти в дистилаті і зростання його кількості. В кубовому залишку відбувається зменшення як концентрації отриманого продукту так і його кількості. Таким чином, найбільш прийнятним є величина мінімального парового числа, яка в наших дослідженнях дорівнювала 3,76.

В процесі проведених досліджень зміна подавання однієї з фаз при фіксації витрати іншої фактично призводить до зміни співвідношення L/G . Тому отримані розподіли кількісних та якісних показників розділення були

приведені до залежностей від співвідношення L/G і наведені на рис. 5.11 – 5.14.

Вплив відношення L/G на процес розділення оцто-водяної суміші показує, що збільшення L/G призводить до збільшення кількості кубового залишку (цільового продукту) при підвищенні концентрації кислоти в ньому. Концентрація кислоти в дистилаті (побічному продукті) зменшується, зменшується і його кількість. Таким чином, зростання співвідношення L/G в дослідженому діапазоні веде до збільшення продуктивності по ціловому продукту з одночасним зростанням його якості.

При цьому падає концентрація ресурсного компоненту у відході при зменшенні його кількості. Отримані результати дозволяють визначити рекомендоване значення L/G на рівні 0,75.

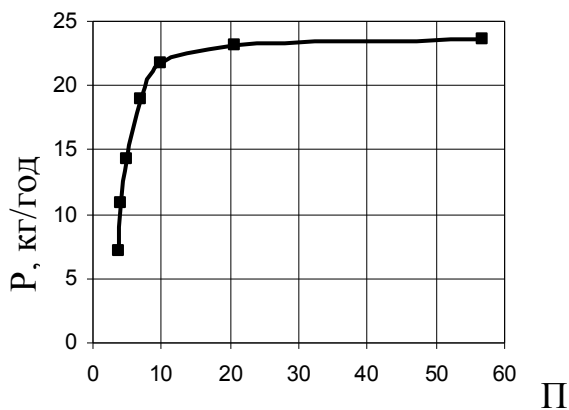


Рис. 5.9. Залежність кількості дистилату від парового числа

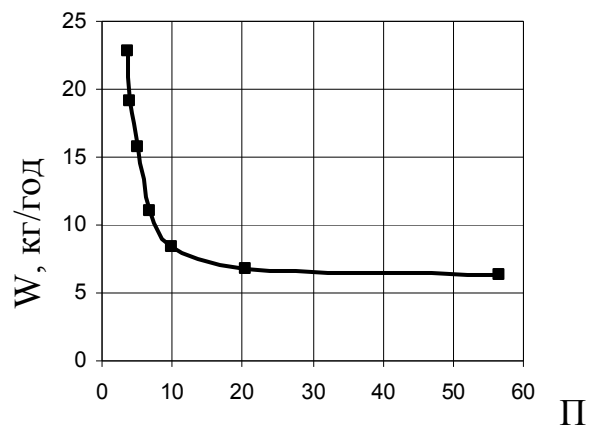


Рис. 5.10. Залежність кількості кубового залишку від парового числа

Таким чином, проведені іспити показали можливість вирішення природоохоронної та виробничої задачі переробки відходу виробництва АЦЕГ на ТОВ «Шостка-Хімпродукт» з поверненням в цикл цільового продукту, отримуючи при цьому позитивний природоохоронний та економічний ефект.

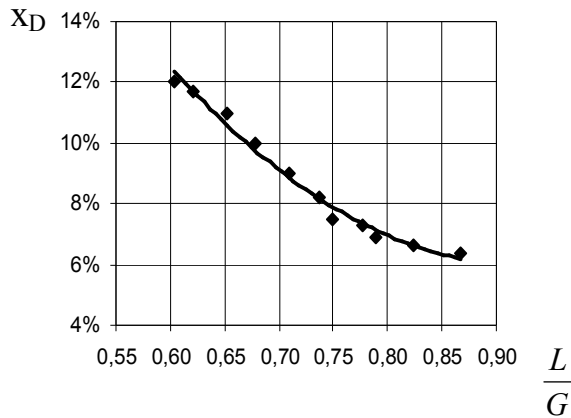


Рис. 5.11. Залежність концентрації кислоти в дистилаті від відношення L/G

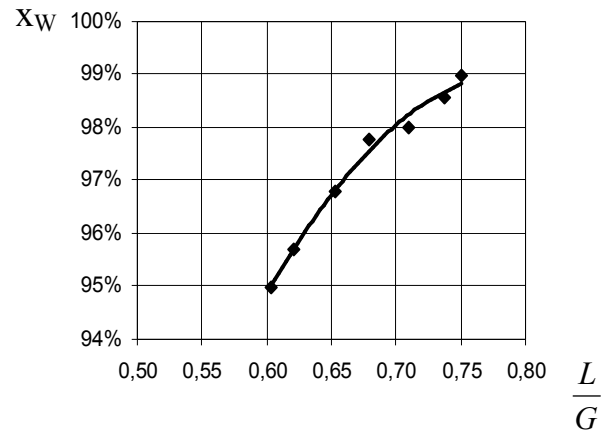


Рис. 5.12. Залежність концентрації кислоти в кубовому залишку від відношення L/G

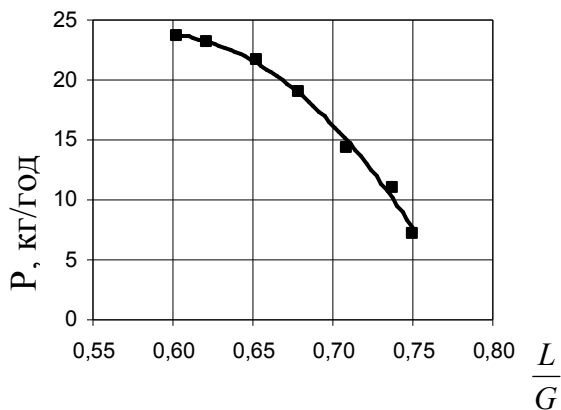


Рис. 5.13. Залежність кількості дистилату від відношення L/G

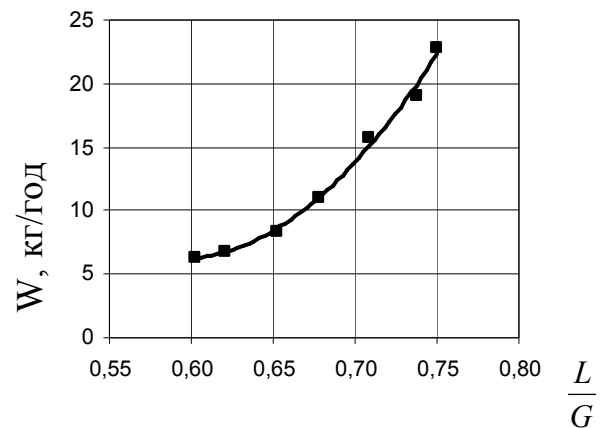


Рис. 5.14. Залежність кількості кубового залишку від відношення L/G

Застосування в даному випадку малогабаритних відцентрових масообмінних апаратів дозволяє значно знизити габаритні розміри обладнання (відповідно капітальні затрати та виробничі площі), а також досягається зниження перепаду тиску в 5–7 разів.

Порівняльна характеристика установки для концентрації оцтової кислоти на базі двох ВМА та колони з сітчастими тарілками приведена в таблиці 5.1.

**Порівняльна характеристика установок для концентрування
оцтової кислоти, побудованих на базі відцентрових масообмінних
апаратів та колони**

Параметр	Відцентровий масообмінний апарат	Колона з сітчастими тарілками
Продуктивність	$8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	$8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$
Витрата пари, що подається	$0,022 \text{ м}^3/\text{с}$	$0,022 \text{ м}^3/\text{с}$
Витрата рідини на зрошення	$9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	$9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
Вихід концентрованої кислоти	$4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	$4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
Габаритні розміри	Відгінний ВМА: - діаметр 0,42 м - ширина 0,07 м Концентраційний ВМА: - діаметр 0,18 м - ширина 0,07 м	Діаметр 0,2 м; висота 10,5 м.
Перепад тиску	1,3 кПа	10 кПа

5.5. Методика інженерного розрахунку ВМА

Технологічний розрахунок ВМА проводиться аналогічно розрахунку колонного апарата за загальноприйнятою методикою [78, 122, 123]. При цьому для забезпечення необхідного ступеня поділу визначається число одиниць переносу, а також навантаження апарата по фазах (L, G). Далі необхідно виконати конструктивний розрахунок ВМА. Для цього потрібно визначити габаритні розміри апарата.

5.5.1. Визначення масообмінних характеристик та геометричних розмірів апарата

Основними геометричними параметрами контактної пристрою є внутрішній r_0 , зовнішній R радіус та ширина h .

Розділову здатність апарата визначає довжина по радіусу $l = R - r_0$, яка визначається як

$$l = h_y \cdot n_y, \quad (5.2)$$

де $h_y = \frac{G}{K_{yV} S_0}$ – висота одиниці переносу, м;

S_0 – площа внутрішнього перетину контактної пристрою, м²;

$n_y = \frac{Y_{ex} - Y_{вих}}{\Delta Y_{сер}}$ – число одиниць переносу.

На першому етапі приймаємо величину висоти одиниці переносу, яку в подальшому ітераційно перевіряємо. Результати теоретичних і експериментальних досліджень в [5] показують, що при визначенні геометричних розмірів ВМА доцільно використовувати співвідношення

$$2 \leq \frac{R}{r_0} \leq 4. \quad (5.3)$$

Внутрішній r_0 та зовнішній R радіус визначаємо з системи рівнянь

$$\begin{cases} R - r_0 = h_y \cdot n_y \\ 2 \leq \frac{R}{r_0} \leq 4 \end{cases} \quad (5.4)$$

Величину внутрішнього перетину S_0 визначаємо з критичної швидкості газу, при якій настає захлинання апарата. Значення $w_{кр}$ рекомендовано приймати на рівні 10 м/с. Звідси

$$S_0 = \frac{G}{w_{кр}}. \quad (5.5)$$

Значення ширини ротора h знаходимо з співвідношення

$$h = \frac{S_0}{2\pi r_0}. \quad (5.6)$$

Перевіряємо прийняту на початку розрахунку величину висоти одиниці переносу з критеріального рівняння.

$$Nu_G = 0,038 Re^{1,09} \left(\frac{L}{G} \right)^{0,13}, \quad (5.7)$$

$$Nu_L = 720 Re^{0,92} \left(\frac{L}{G} \right)^{0,2}. \quad (5.8)$$

При необхідності уточнюємо висоту одиниці переносу і робимо перерахунок.

5.5.2 Визначення швидкості обертання

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що в ВМА стабільний режим масообміну настає при досягненні відцентрової сили в середньому перетині контактної пристрою на рівні $a_{вц.сер.} = 1500 \text{ м/с}^2$. Таким чином, необхідна швидкість обертання (об/хв) визначається як

$$w_{об} = 60 \cdot 2\pi \sqrt{\frac{2 a_{вы.сер.}}{R + r_0}}. \quad (5.9)$$

5.5.3. Визначення гідравлічного опору

Повний гідравлічний опір апарата визначається як

$$\Delta P = \Delta P_{сyx} \cdot f_L. \quad (5.10)$$

Величина гідравлічного опору сухого апарата визначається

$$\Delta P_{сyx} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_i + \Delta P_{c_i}). \quad (5.11)$$

Де в свою чергу

$$\Delta P_i = P(r_{i+1}) - P(r_i) = k_{ex} \lambda \left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) \frac{\rho_e}{2} (w_{r_{i+1}}^2 + w_{\varphi_{i+1}}^2), \quad (5.12)$$

$$\Delta P_c = \xi_c \frac{\rho w^2}{2}. \quad (5.13)$$

В (5.11) при $r_{i+1} = R$, необхідно враховувати вплив вхідної зони через k_{ex} , а величина w_{φ_R} приймається як $w_{\varphi_R} = \omega R$. Для всіх наступних ділянок контактної пристрою (при $i = n-1$ та менше) вхідна зона не здійснює впливу, тобто $k_{ex} = 1$, а колова складова швидкості визначається з (3.23) як

$$w_{\varphi_i} = \frac{w'_{\varphi_i} - \omega r_i (1 - k_{\varphi})}{k_{\varphi}}.$$

Величина w'_{φ_i} в свою чергу згідно (3.9) дорівнює $w'_{\varphi_i} = w_{\varphi_{i-1}} (r_{i-1}/r_i)$.

Коефіцієнти k_{ex} , k_{φ} та λ визначаються в залежності від режиму роботи апарата за (4.6) – (4.12).

Фактор зрошення f_L , який враховує вплив зрошення на загальний опір визначається як

$$f_L = 1,97 \cdot \text{Re}^{0,14} Fr_{вц}^{0,12}. \quad (5.14)$$

Приведена інженерна методика розрахунку ВМА дозволяє визначати геометричні розміри контактної пристрою, робочу швидкість обертання, масообмінні показники роботи та гідравлічний опір апарата. Блок-схема алгоритму для розрахунку ВМА наведена в додатку Д.

5.6. Висновки до п'ятого розділу

При узагальненні отриманих теоретичних та експериментальних результатів досліджень розроблена методика інженерного розрахунку відцентрового масообмінного апарата з контактним пристроєм запропонованої конструкції.

Проведена апробація в промислових умовах роботи відцентрового масообмінного апарата з розробленим типом контактної пристрою. Побудована ректифікаційна установка на базі двох відцентрових апаратів, яка випробувалась в умовах виробництва ацетату етиленгліколю. Проведені дослідно-промислові випробування на стадії ректифікації оцтової кислоти з отриманням цільового продукту та з метою повернення його у виробничий цикл. Результати показали надійність та стабільність робочих показників розробленого рішення при зниженні габаритних розмірів та значному зменшенні перепаду тиску.

Основні результати розділу опубліковані в [124].

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу інтенсифікації процесів масообміну із застосуванням поля відцентрових сил та існуючих конструкцій відцентрових апаратів обґрунтований перспективний напрямок досліджень – організація багатократного диспергування рідини всередині обертового перфорованого ротору в режимі протитечійної взаємодії фаз.

2. Розроблена конструкція контактної пристрою для відцентрового масообмінного апарата, яка забезпечує високі масообмінні показники за рахунок організації взаємодії фаз у нестационарних гідродинамічних режимах.

3. Розроблено фізичну та математичні моделі гідродинаміки фаз у контактному пристрої, що дозволяють отримувати розподіл полів швидкості газу, гідравлічний опір контактної пристрою та характеристики дисперсної фази.

4. Проведені експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик ВМА підтвердили адекватність отриманих теоретичних результатів. У результаті обробки експериментальних даних отримані залежності і коефіцієнти теоретичних моделей.

5. Експериментально отримані залежності масообмінних характеристик ВМА від конструктивних розмірів контактної пристрою та режимних параметрів його роботи. Визначені рекомендовані діапазони роботи апарата та конструктивні характеристики контактної пристрою. В тому числі рекомендована швидкість обертання, яка забезпечує відцентрову силу у зоні взаємодії фаз на рівні 1000 м/с^2 , та рекомендований крок між контактними елементами $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

6. Розроблено методику інженерного розрахунку ВМА з запропонованим типом контактної пристрою, визначені рекомендації до його проектування та експлуатації.

7. Результати досліджень були використані під час проектування ректифікаційної установки на базі двох відцентрових апаратів, яка пройшла успішні випробування в промислових умовах.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1

**Результати експериментальних досліджень дисперсних
характеристик рідини**

Сітка		Швид- кість обертан- ня, об/хв	Відцент рове приско- рення, м/с ²	d_{mod} , мм	Середньо- квадратичне відхилення σ_x для d_{mod} , мм	d_{32} , мм	k'	A
Ø пров., м	Н чарун- ки, мм							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,2	0,32	600	177	0,79	0,430	1,38	1,20	1,26
1,2	0,32	800	316	0,63	0,197	1,05	1,29	1,08
1,2	0,32	1200	710	0,44	0,193	0,63	0,89	1,23
1,2	0,32	1600	1262	0,34	0,103	0,40	0,72	1,02
1,2	0,32	2000	1972	0,31	0,078	0,34	0,76	1,10
1,2	0,32	2200	2386	0,29	0,052	0,33	0,76	1,14
1,2	0,32	2500	3081	0,27	0,045	0,31	0,77	1,15
0,63	0,32	600	177	0,75	0,382	1,01	0,82	1,35
0,63	0,32	800	316	0,63	0,213	0,76	0,83	1,21
0,63	0,32	1200	710	0,40	0,091	0,44	0,69	1,12
0,63	0,32	1600	1262	0,36	0,077	0,38	0,76	1,06
0,63	0,32	2000	1972	0,33	0,069	0,36	0,81	1,09
0,63	0,32	2200	2386	0,32	0,064	0,34	0,83	1,06
0,63	0,32	2500	3081	0,30	0,058	0,32	0,85	1,07
1,6	0,4	600	177	0,82	0,387	0,95	0,84	1,16
1,6	0,4	800	316	0,68	0,189	0,78	0,84	1,15
1,6	0,4	1200	710	0,45	0,105	0,50	0,73	1,10
1,6	0,4	800	316	0,68	0,189	0,78	0,84	1,15
1,6	0,4	1200	710	0,45	0,105	0,50	0,73	1,10
1,6	0,4	1600	1262	0,41	0,059	0,43	0,80	1,05
1,6	0,4	2000	1972	0,36	0,055	0,39	0,82	1,08
1,6	0,4	2200	2386	0,33	0,053	0,35	0,80	1,05
1,6	0,4	2500	3081	0,31	0,051	0,34	0,82	1,10
1,0	0,4	600	177	0,77	0,376	1,09	0,78	1,42
1,0	0,4	800	316	0,65	0,195	0,84	0,80	1,29
1,0	0,4	1200	710	0,43	0,187	0,51	0,70	1,19
1,0	0,4	1600	1262	0,40	0,095	0,42	0,78	1,05
1,0	0,4	2000	1972	0,35	0,065	0,39	0,80	1,11
1,0	0,4	2200	2386	0,32	0,057	0,35	0,77	1,09
1,0	0,4	2500	3081	0,32	0,051	0,34	0,84	1,06

Додаток Б.1

Таблиця Б.1.1

Експериментальні дані дослідження перепаду тиску в апараті. Крок між елементами контактного пристрою в досліджуваній ділянці 20 мм

$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$n, \text{ об/хв}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$w_z, \text{ м/с}$	$\Delta P, \text{ Па}$
1	2	3	4	5	6
0,016	0	0	0	1,74	98
0,016	0	500	52	1,74	147
0,016	0	1000	105	1,74	304
0,016	0	1500	157	1,74	500
0,016	0	2000	209	1,74	795
0,016	0	2500	262	1,74	1113
0,023	0	0	0	2,46	196
0,023	0	500	52	2,46	245
0,023	0	1000	105	2,46	402
0,023	0	1500	157	2,46	638
0,023	0	2000	209	2,46	937
0,023	0	2500	262	2,46	1285
0,028	0	0	0	2,94	275
0,028	0	500	52	2,94	319
0,028	0	1000	105	2,94	500
0,028	0	1500	157	2,94	731
0,028	0	2000	209	2,94	1045
0,028	0	2500	262	2,94	1422
0,031	0	0	0	3,25	329
0,031	0	500	52	3,25	368
0,031	0	1000	105	3,25	544
0,031	0	1500	157	3,25	819
0,031	0	2000	209	3,25	1128
0,031	0	2500	262	3,25	1516
0,040	0	0	0	4,28	554
0,040	0	500	52	4,28	584
0,040	0	1000	105	4,28	790
0,040	0	1500	157	4,28	1074
0,040	0	2000	209	4,28	1422
0,040	0	2500	262	4,28	1849
0,044	0	0	0	4,70	667
0,044	0	500	52	4,70	692
0,044	0	1000	105	4,70	873

Продовження таблиці Б.1.1

1	2	3	4	5	6
0,044	0	1500	157	4,70	1167
0,044	0	2000	209	4,70	1530
0,031	0	0	0	3,25	329
0,031	0	500	52	3,25	368
0,031	0	1000	105	3,25	544
0,031	0	1500	157	3,25	819
0,031	0	2000	209	3,25	1128
0,031	0	2500	262	3,25	1516
0,040	0	0	0	4,28	554
0,040	0	500	52	4,28	584
0,040	0	1000	105	4,28	790
0,040	0	1500	157	4,28	1074
0,040	0	2000	209	4,28	1422
0,040	0	2500	262	4,28	1849
0,044	0	0	0	4,70	667
0,044	0	500	52	4,70	692
0,044	0	1000	105	4,70	873
0,044	0	1500	157	4,70	1167
0,044	0	2000	209	4,70	1530
0,016	0,116	500	52	1,74	466
0,016	0,116	670	70	1,74	427
0,016	0,116	700	73	1,74	334
0,016	0,116	1100	115	1,74	329
0,016	0,116	1500	157	1,74	417
0,016	0,116	1800	188	1,74	535
0,016	0,116	2000	209	1,74	618
0,016	0,116	2500	262	1,74	829
0,023	0,116	580	61	2,46	785
0,023	0,116	630	66	2,46	589
0,023	0,116	750	79	2,46	540
0,023	0,116	900	94	2,46	530
0,023	0,116	1050	110	2,46	500
0,023	0,116	1070	112	2,46	471
0,023	0,116	1200	126	2,46	471
0,023	0,116	1500	157	2,46	535
0,023	0,116	1800	188	2,46	662
0,023	0,116	2000	209	2,46	760
0,023	0,116	2500	262	2,46	1030
0,028	0,116	600	63	2,94	868
0,028	0,116	800	84	2,94	638

Продовження таблиці Б.1.1

1	2	3	4	5	6
0,028	0,116	900	94	2,94	628
0,028	0,116	1100	115	2,94	598
0,028	0,116	1150	120	2,94	564
0,028	0,116	1270	133	2,94	564
0,028	0,116	1500	157	2,94	623
0,028	0,116	1800	188	2,94	760
0,028	0,116	2000	209	2,94	853
0,028	0,116	2500	262	2,94	1153
0,031	0,116	650	68	3,25	932
0,031	0,116	800	84	3,25	755
0,031	0,116	900	94	3,25	716
0,031	0,116	1000	105	3,25	706
0,031	0,116	1100	115	3,25	701
0,031	0,116	1250	131	3,25	652
0,031	0,116	1310	137	3,25	652
0,031	0,116	1500	157	3,25	711
0,031	0,116	1800	188	3,25	824
0,031	0,116	2000	209	3,25	932
0,031	0,116	2500	262	3,25	1246
0,040	0,116	800	84	4,26	1167
0,040	0,116	900	94	4,26	1138
0,040	0,116	1020	107	4,26	1015
0,040	0,116	1050	110	4,26	991
0,040	0,116	1360	142	4,26	991
0,040	0,116	1500	157	4,26	1040
0,040	0,116	1800	188	4,26	1182
0,040	0,116	2000	209	4,26	1300
0,040	0,116	2500	262	4,26	1624

Додаток Б.2

Таблиця Б.2.1

Експериментальні дані дослідження перепаду тиску в апараті. Крок між елементами контактної пристрою в досліджуваній ділянці 10 мм

$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$n, \text{ об/хв}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$w_z, \text{ м/с}$	$\Delta P, \text{ Па}$
1	2	3	4	5	6
0,016	0	0	0	1,74	123
0,016	0	500	52	1,74	157
0,016	0	1000	105	1,74	255
0,016	0	1500	157	1,74	422
0,016	0	2000	209	1,74	623
0,016	0	2500	262	1,74	868
0,023	0	0	0	2,46	231
0,023	0	500	52	2,46	275
0,023	0	1000	105	2,46	373
0,023	0	1500	157	2,46	559
0,023	0	2000	209	2,46	785
0,023	0	2500	262	2,46	1064
0,028	0	0	0	2,94	324
0,028	0	500	52	2,94	368
0,028	0	1000	105	2,94	476
0,028	0	1500	157	2,94	667
0,028	0	2000	209	2,94	907
0,028	0	2500	262	2,94	1187
0,031	0	0	0	3,25	397
0,031	0	500	52	3,25	451
0,031	0	1000	105	3,25	549
0,031	0	1500	157	3,25	741
0,031	0	2000	209	3,25	996
0,031	0	2500	262	3,25	1275
0,040	0	0	0	4,28	667
0,040	0	500	52	4,28	746
0,040	0	1000	105	4,28	844
0,040	0	1500	157	4,28	1020
0,040	0	2000	209	4,28	1329
0,040	0	2500	262	4,28	1648
0,016	0	0	0	1,74	123
0,023	0	0	0	2,46	231
0,028	0	0	0	2,94	324

Продовження таблиці Б.2.1

1	2	3	4	5	6
0,031	0	0	0	3,25	397
0,040	0	0	0	4,28	667
0,044	0	0	0	4,70	775
0,016	0	500	52	1,74	157
0,023	0	500	52	2,46	275
0,028	0	500	52	2,94	368
0,031	0	500	52	3,25	451
0,040	0	500	52	4,28	746
0,044	0	500	52	4,70	878
0,016	0	1000	105	1,74	255
0,023	0	1000	105	2,46	373
0,028	0	1000	105	2,94	476
0,031	0	1000	105	3,25	549
0,040	0	1000	105	4,28	844
0,044	0	1000	105	4,70	976
0,016	0	1500	157	1,74	422
0,023	0	1500	157	2,46	559
0,028	0	1500	157	2,94	667
0,031	0	1500	157	3,25	741
0,040	0	1500	157	4,28	1020
0,044	0	1500	157	4,70	1148
0,016	0	2000	209	1,74	623
0,023	0	2000	209	2,46	785
0,028	0	2000	209	2,94	907
0,031	0	2000	209	3,25	996
0,040	0	2000	209	4,28	1329
0,044	0	2000	209	4,70	1481
0,016	0	2500	262	1,74	868
0,023	0	2500	262	2,46	1064
0,028	0	2500	262	2,94	1187
0,031	0	2500	262	3,25	1275
0,040	0	2500	262	4,28	1648
0,016	0,116	480	50	1,74	613
0,016	0,116	520	54	1,74	574
0,016	0,116	1000	105	1,74	574
0,016	0,116	1030	108	1,74	574
0,016	0,116	1210	127	1,74	574
0,016	0,116	1280	134	1,74	515
0,016	0,116	1340	140	1,74	451
0,016	0,116	1400	147	1,74	441

Продовження таблиці Б.2.1

1	2	3	4	5	6
0,016	0,116	1480	155	1,74	432
0,016	0,116	1520	159	1,74	432
0,016	0,116	1600	167	1,74	451
0,016	0,116	1800	188	1,74	500
0,016	0,116	2000	209	1,74	574
0,016	0,116	2500	262	1,74	760
0,023	0,116	640	67	2,46	927
0,023	0,116	790	83	2,46	834
0,023	0,116	860	90	2,46	795
0,023	0,116	940	98	2,46	785
0,023	0,116	1000	105	2,46	785
0,023	0,116	1040	109	2,46	785
0,023	0,116	1090	114	2,46	770
0,023	0,116	1180	124	2,46	785
0,023	0,116	1200	126	2,46	721
0,023	0,116	1340	140	2,46	721
0,023	0,116	1375	144	2,46	711
0,023	0,116	1460	153	2,46	638
0,023	0,116	1480	155	2,46	613
0,023	0,116	1600	167	2,46	613
0,023	0,116	1630	171	2,46	628
0,023	0,116	1800	188	2,46	662
0,023	0,116	2000	209	2,46	721
0,023	0,116	2500	262	2,46	971
0,028	0,116	680	71	2,94	1069
0,028	0,116	720	75	2,94	1030
0,028	0,116	760	80	2,94	1030
0,028	0,116	800	84	2,94	1030
0,028	0,116	890	93	2,94	1025
0,028	0,116	1015	106	2,94	942
0,028	0,116	1020	107	2,94	907
0,028	0,116	1125	118	2,94	907
0,028	0,116	1215	127	2,94	883
0,028	0,116	1270	133	2,94	893
0,028	0,116	1300	136	2,94	839
0,028	0,116	1370	143	2,94	839
0,028	0,116	1420	149	2,94	819
0,028	0,116	1500	157	2,94	760
0,028	0,116	1700	178	2,94	775
0,028	0,116	1800	188	2,94	800

Продовження таблиці Б.2.1

1	2	3	4	5	6
0,028	0,116	2000	209	2,94	873
0,028	0,116	2500	262	2,94	1113
0,031	0,116	670	70	3,25	1251
0,031	0,116	860	90	3,25	1128
0,031	0,116	960	100	3,25	1089
0,031	0,116	1010	106	3,25	1025
0,031	0,116	1030	108	3,25	1025
0,031	0,116	1130	118	3,25	1025
0,031	0,116	1200	126	3,25	1040
0,031	0,116	1260	132	3,25	1035
0,031	0,116	1330	139	3,25	1025
0,031	0,116	1350	141	3,25	937
0,031	0,116	1400	147	3,25	917
0,031	0,116	1420	149	3,25	917
0,031	0,116	1470	154	3,25	893
0,031	0,116	1520	159	3,25	858
0,031	0,116	1630	171	3,25	858
0,031	0,116	1800	188	3,25	898
0,031	0,116	2000	209	3,25	981
0,031	0,116	2500	262	3,25	1226
0,040	0,116	790	83	4,28	1521
0,040	0,116	900	94	4,28	1447
0,040	0,116	940	98	4,28	1408
0,040	0,116	1000	105	4,28	1398
0,040	0,116	1100	115	4,28	1399
0,040	0,116	1150	120	4,28	1373
0,040	0,116	1200	126	4,28	1398
0,040	0,116	1380	144	4,28	1422
0,040	0,116	1500	157	4,28	1400
0,040	0,116	1640	172	4,28	1236
0,040	0,116	1690	177	4,28	1251
0,040	0,116	1780	186	4,28	1265
0,040	0,116	1800	188	4,28	1300
0,040	0,116	2000	209	4,28	1383
0,040	0,116	2500	262	4,28	1594
0,011	0,133	1000	105	1,18	302
0,011	0,119	1000	105	1,18	303
0,011	0,098	1000	105	1,18	303
0,011	0,077	1000	105	1,18	304
0,011	0,063	1000	105	1,18	302

Продовження таблиці Б.2.1

1	2	3	4	5	6
0,011	0,056	1000	105	1,18	302
0,011	0,055	1000	105	1,18	294
0,011	0,047	1000	105	1,18	278
0,011	0,036	1000	105	1,18	205
0,011	0,025	1000	105	1,18	181
0,011	0,133	1500	157	1,18	254
0,011	0,121	1500	157	1,18	254
0,011	0,109	1500	157	1,18	252
0,011	0,088	1500	157	1,18	254
0,011	0,067	1500	157	1,18	253
0,011	0,049	1500	157	1,18	255
0,011	0,035	1500	157	1,18	254
0,011	0,033	1500	157	1,18	262
0,011	0,022	1500	157	1,18	270
0,011	0,133	2000	209	1,18	380
0,011	0,120	2001	209	1,18	380
0,011	0,105	2000	209	1,18	377
0,011	0,091	2000	209	1,18	379
0,011	0,077	2000	209	1,18	379
0,011	0,067	2000	209	1,18	382
0,011	0,060	2000	209	1,18	383
0,011	0,049	2000	209	1,18	380
0,011	0,046	2000	209	1,18	408
0,011	0,031	2000	209	1,18	424
0,014	0,133	1000	105	1,52	380
0,014	0,120	1000	105	1,52	379
0,014	0,091	1000	105	1,52	380
0,014	0,089	1000	105	1,52	375
0,014	0,074	1000	105	1,52	378
0,014	0,059	1000	105	1,52	374
0,014	0,050	1000	105	1,52	351
0,014	0,040	1000	105	1,52	327
0,014	0,034	1000	105	1,52	286
0,014	0,133	1500	157	1,52	319
0,014	0,120	1500	157	1,52	320
0,014	0,105	1500	157	1,52	322
0,014	0,091	1500	157	1,52	319
0,014	0,077	1500	157	1,52	316
0,014	0,062	1500	157	1,52	318
0,014	0,053	1500	157	1,52	319

Продовження таблиці Б.2.1

1	2	3	4	5	6
0,014	0,049	1500	157	1,52	343
0,014	0,041	1500	157	1,52	351
0,014	0,133	2000	209	1,52	456
0,014	0,119	2000	209	1,52	458
0,014	0,105	2000	209	1,52	458
0,014	0,091	2000	209	1,52	455
0,014	0,077	2000	209	1,52	459
0,014	0,067	2000	209	1,52	460
0,014	0,056	2000	209	1,52	456
0,014	0,053	2000	209	1,52	472
0,014	0,041	2000	209	1,52	480
0,014	0,032	2000	209	1,52	485
0,016	0,133	1000	105	1,69	412
0,016	0,119	1000	105	1,69	412
0,016	0,104	1000	105	1,69	411
0,016	0,084	1000	105	1,69	412
0,016	0,063	1000	105	1,69	414
0,016	0,053	1000	105	1,69	412
0,016	0,051	1000	105	1,69	367
0,016	0,034	1000	105	1,69	302
0,016	0,133	1500	157	1,69	367
0,016	0,119	1500	157	1,69	366
0,016	0,106	1500	157	1,69	366
0,016	0,084	1500	157	1,69	369
0,016	0,067	1500	157	1,69	367
0,016	0,050	1500	157	1,69	368
0,016	0,035	1500	157	1,69	367
0,016	0,032	1500	157	1,69	375
0,016	0,133	2000	209	1,69	513
0,016	0,119	2000	209	1,69	513
0,016	0,105	2000	209	1,69	512
0,016	0,091	2000	209	1,69	514
0,016	0,077	2000	209	1,69	515
0,016	0,067	2000	209	1,69	516
0,016	0,060	2000	209	1,69	513
0,016	0,058	2000	209	1,69	521
0,016	0,049	2000	209	1,69	517
0,016	0,035	2000	209	1,69	519
0,016	0,032	2000	209	1,69	525

Додаток Б.3

Таблиця Б.3.1

Експериментальні дані дослідження перепаду тиску в апараті. Крок між елементами контактної пристрою в досліджуваній ділянці 5 мм

$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$n, \text{ об/хв}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$w_z, \text{ м/с}$	$\Delta P, \text{ Па}$
1	2	3	4	5	6
0,016	0	0	0	1,74	93
0,016	0	500	52	1,74	132
0,016	0	1000	105	1,74	226
0,016	0	1500	157	1,74	378
0,016	0	2000	209	1,74	564
0,016	0	2500	262	1,74	785
0,023	0	0	0	2,46	167
0,023	0	500	52	2,46	206
0,023	0	1000	105	2,46	324
0,023	0	1500	157	2,46	491
0,023	0	2000	209	2,46	706
0,023	0	2500	262	2,46	937
0,028	0	0	0	2,94	245
0,028	0	500	52	2,94	280
0,028	0	1000	105	2,94	397
0,028	0	1500	157	2,94	569
0,028	0	2000	209	2,94	795
0,028	0	2500	262	2,94	1059
0,031	0	0	0	3,25	289
0,031	0	500	52	3,25	334
0,031	0	1000	105	3,25	451
0,031	0	1500	157	3,25	638
0,031	0	2000	209	3,25	863
0,031	0	2500	262	3,25	1148
0,040	0	0	0	4,28	491
0,040	0	500	52	4,28	544
0,040	0	1000	105	4,28	657
0,040	0	1500	157	4,28	858

Продовження таблиці Б.3.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0	2000	209	4,28	1113
0,040	0	2500	262	4,28	1413
0,044	0	0	0	4,70	579
0,044	0	500	52	4,70	623
0,044	0	1000	105	4,70	746
0,044	0	1500	157	4,70	947
0,044	0	2000	209	4,70	1197
0,016	0,116	520	54	1,74	770
0,016	0,116	700	73	1,74	589
0,016	0,116	770	81	1,74	589
0,016	0,116	830	87	1,74	584
0,016	0,116	920	96	1,74	564
0,016	0,116	980	103	1,74	540
0,016	0,116	1030	108	1,74	540
0,016	0,116	1010	106	1,74	515
0,016	0,116	1240	130	1,74	515
0,016	0,116	1340	140	1,74	392
0,016	0,116	1360	142	1,74	378
0,016	0,116	1430	150	1,74	378
0,016	0,116	1580	165	1,74	378
0,016	0,116	1800	188	1,74	441
0,016	0,116	2000	209	1,74	515
0,016	0,116	2500	262	1,74	711
0,023	0,116	620	65	2,46	907
0,023	0,116	830	87	2,46	809
0,023	0,116	875	92	2,46	770
0,023	0,116	990	104	2,46	746
0,023	0,116	1010	106	2,46	721
0,023	0,116	1050	110	2,46	697
0,023	0,116	1135	119	2,46	697
0,023	0,116	1180	124	2,46	623
0,023	0,116	1320	138	2,46	623
0,023	0,116	1380	144	2,46	598
0,023	0,116	1450	152	2,46	515
0,023	0,116	1540	161	2,46	515

Продовження таблиці Б.3.1

1	2	3	4	5	6
0,023	0,116	1800	188	2,46	515
0,023	0,116	2000	209	2,46	638
0,023	0,116	2500	262	2,46	858
0,028	0,116	710	74	2,94	1055
0,028	0,116	880	92	2,94	932
0,028	0,116	980	103	2,94	883
0,028	0,116	1050	110	2,94	844
0,028	0,116	1100	115	2,94	809
0,028	0,116	1220	128	2,94	819
0,028	0,116	1250	131	2,94	711
0,028	0,116	1350	141	2,94	711
0,028	0,116	1400	147	2,94	711
0,028	0,116	1470	154	2,94	672
0,028	0,116	1500	157	2,94	643
0,028	0,116	1690	177	2,94	638
0,028	0,116	1800	188	2,94	672
0,028	0,116	2000	209	2,94	746
0,028	0,116	2500	262	2,94	966
0,031	0,116	680	71	3,25	1079
0,031	0,116	800	84	3,25	1030
0,031	0,116	980	103	3,25	966
0,031	0,116	1070	112	3,25	907
0,031	0,116	1080	113	3,25	893
0,031	0,116	1190	125	3,25	893
0,031	0,116	1260	132	3,25	907
0,031	0,116	1400	147	3,25	785
0,031	0,116	1550	162	3,25	721
0,031	0,116	1600	167	3,25	721
0,031	0,116	1720	180	3,25	721
0,031	0,116	1740	182	3,25	736
0,031	0,116	1800	188	3,25	746
0,031	0,116	2000	209	3,25	819
0,031	0,116	2500	262	3,25	1064
0,040	0,116	750	79	4,28	1408
0,040	0,116	880	92	4,28	1334

Продовження таблиці Б.3.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0,116	1020	107	4,28	1300
0,040	0,116	1120	117	4,28	1236
0,040	0,116	1170	122	4,28	1202
0,040	0,116	1290	135	4,28	1221
0,040	0,116	1360	142	4,28	1236
0,040	0,116	1400	147	4,28	1261
0,040	0,116	1500	157	4,28	1300
0,040	0,116	1580	165	4,28	1040
0,040	0,116	1620	170	4,28	1020
0,040	0,116	1670	175	4,28	1020
0,040	0,116	1780	186	4,28	1020
0,040	0,116	1800	188	4,28	1030
0,040	0,116	1900	199	4,28	1069
0,040	0,116	2000	209	4,28	1094
0,040	0,116	2500	262	4,28	1378

Додаток Б.4

Таблиця Б.4.1

Експериментальні дані дослідження перепаду тиску в апараті. Крок між елементами контактної пристрою в досліджуваній ділянці 3 мм

$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$n, \text{ об/хв}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$w_z, \text{ м/с}$	$\Delta P, \text{ Па}$
1	2	3	4	5	6
0,016	0	0	0	1,74	113
0,016	0	500	52	1,74	152
0,016	0	1000	105	1,74	255
0,016	0	1500	157	1,74	412
0,016	0	2000	209	1,74	613
0,016	0	2500	262	1,74	829
0,023	0	0	0	2,46	221
0,023	0	500	52	2,46	260
0,023	0	1000	105	2,46	363
0,023	0	1500	157	2,46	540
0,023	0	2000	209	2,46	770
0,023	0	2500	262	2,46	1015
0,028	0	0	0	2,94	309
0,028	0	500	52	2,94	334
0,028	0	1000	105	2,94	446
0,028	0	1500	157	2,94	647
0,028	0	2000	209	2,94	898
0,028	0	2500	262	2,94	1167
0,031	0	0	0	3,25	363
0,031	0	500	52	3,25	412
0,031	0	1000	105	3,25	569
0,031	0	1500	157	3,25	706
0,031	0	2000	209	3,25	956
0,031	0	2500	262	3,25	1236
0,040	0	0	0	4,28	623
0,040	0	500	52	4,28	682
0,040	0	1000	105	4,28	790
0,040	0	1500	157	4,28	996
0,040	0	2000	209	4,28	1265

Продовження таблиці Б.4.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0	2500	262	4,28	1565
0,044	0	0	0	4,70	721
0,044	0	500	52	4,70	804
0,044	0	1000	105	4,70	912
0,044	0	1500	157	4,70	1104
0,044	0	2000	209	4,70	1393
0,016	0,116	530	55	1,74	145
0,016	0,116	600	63	1,74	105
0,016	0,116	630	66	1,74	102
0,016	0,116	680	71	1,74	102
0,016	0,116	700	73	1,74	85
0,016	0,116	750	79	1,74	82
0,016	0,116	800	84	1,74	79
0,016	0,116	850	89	1,74	75
0,016	0,116	900	94	1,74	72
0,016	0,116	1050	110	1,74	72
0,016	0,116	1200	126	1,74	76
0,016	0,116	1340	140	1,74	76
0,016	0,116	1500	157	1,74	82
0,016	0,116	1800	188	1,74	98
0,016	0,116	2000	209	1,74	110
0,016	0,116	2500	262	1,74	152
0,023	0,116	610	64	2,46	175
0,023	0,116	630	66	2,46	143
0,023	0,116	700	73	2,46	137
0,023	0,116	720	75	2,46	135
0,023	0,116	770	81	2,46	132
0,023	0,116	840	88	2,46	121
0,023	0,116	900	94	2,46	119
0,023	0,116	1000	105	2,46	115
0,023	0,116	1370	143	2,46	114
0,023	0,116	1400	147	2,46	110
0,023	0,116	1500	157	2,46	115
0,023	0,116	1570	164	2,46	118
0,023	0,116	1800	188	2,46	130

Продовження таблиці Б.4.1

1	2	3	4	5	6
0,023	0,116	2000	209	2,46	145
0,023	0,116	2500	262	2,46	190
0,028	0,116	620	65	2,94	1030
0,028	0,116	670	70	2,94	1006
0,028	0,116	770	81	2,94	804
0,028	0,116	800	84	2,94	790
0,028	0,116	900	94	2,94	765
0,028	0,116	1000	105	2,94	755
0,028	0,116	1050	110	2,94	746
0,028	0,116	1100	115	2,94	736
0,028	0,116	1240	130	2,94	736
0,028	0,116	1330	139	2,94	726
0,028	0,116	1500	157	2,94	711
0,028	0,116	1800	188	2,94	780
0,028	0,116	2000	209	2,94	849
0,028	0,116	2500	262	2,94	1074
0,031	0,116	700	73	3,25	1118
0,031	0,116	780	82	3,25	1050
0,031	0,116	900	94	3,25	903
0,031	0,116	1000	105	3,25	868
0,031	0,116	1130	118	3,25	858
0,031	0,116	1260	132	3,25	858
0,031	0,116	1400	147	3,25	834
0,031	0,116	1460	153	3,25	819
0,031	0,116	1500	157	3,25	819
0,031	0,116	1650	173	3,25	824
0,031	0,116	1800	188	3,25	863
0,031	0,116	2000	209	3,25	937
0,031	0,116	2500	262	3,25	1177
0,040	0,116	750	79	4,28	1496
0,040	0,116	830	87	4,28	1472
0,040	0,116	880	92	4,28	1457
0,040	0,116	940	98	4,28	1447
0,040	0,116	950	99	4,28	1422
0,040	0,116	1050	110	4,28	1422

Продовження таблиці Б.4.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0,116	1160	121	4,28	1324
0,040	0,116	1170	122	4,28	1261
0,040	0,116	1260	132	4,28	1261
0,040	0,116	1300	136	4,28	1261
0,040	0,116	1400	147	4,28	1246
0,040	0,116	1460	153	4,28	1207
0,040	0,116	1500	157	4,28	1202
0,040	0,116	1670	175	4,28	1182
0,040	0,116	1730	181	4,28	1212
0,040	0,116	1800	188	4,28	1236
0,040	0,116	2000	209	4,28	1324
0,040	0,116	2500	262	4,28	1579

Додаток Б.5

Таблиця Б.5.1

Експериментальні дані дослідження перепаду тиску в апараті. Крок між елементами контактного пристрою в досліджуваній ділянці 1,5 мм

$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$n, \text{ об/хв}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$w_z, \text{ м/с}$	$\Delta P, \text{ Па}$
1	2	3	4	5	6
0,016	0	0	0	1,74	128
0,016	0	500	52	1,74	152
0,016	0	1000	105	1,74	265
0,016	0	1500	157	1,74	427
0,016	0	2000	209	1,74	667
0,016	0	2500	262	1,74	922
0,023	0	0	0	2,46	240
0,023	0	500	52	2,46	265
0,023	0	1000	105	2,46	373
0,023	0	1500	157	2,46	554
0,023	0	2000	209	2,46	795
0,023	0	2500	262	2,46	1084
0,028	0	0	0	2,94	324
0,028	0	500	52	2,94	348
0,028	0	1000	105	2,94	461
0,028	0	1500	157	2,94	657
0,028	0	2000	209	2,94	907
0,028	0	2500	262	2,94	1197
0,031	0	0	0	3,25	392
0,031	0	500	52	3,25	407
0,031	0	1000	105	3,25	525
0,031	0	1500	157	3,25	731
0,031	0	2000	209	3,25	986
0,031	0	2500	262	3,25	1275
0,040	0	0	0	4,28	667
0,040	0	500	52	4,28	687
0,040	0	1000	105	4,28	800
0,040	0	1500	157	4,28	1001
0,040	0	2000	209	4,28	1256

Продовження таблиці Б.5.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0	2500	262	4,28	1565
0,016	0,116	540	57	1,74	736
0,016	0,116	570	60	1,74	329
0,016	0,116	600	63	1,74	319
0,016	0,116	650	68	1,74	314
0,016	0,116	800	84	1,74	314
0,016	0,116	1000	105	1,74	314
0,016	0,116	1100	115	1,74	334
0,016	0,116	1200	126	1,74	334
0,016	0,116	1500	157	1,74	387
0,016	0,116	1800	188	1,74	476
0,016	0,116	2000	209	1,74	549
0,016	0,116	2500	262	1,74	731
0,023	0,116	620	65	2,46	932
0,023	0,116	750	79	2,46	858
0,023	0,116	770	81	2,46	594
0,023	0,116	800	84	2,46	584
0,023	0,116	900	94	2,46	549
0,023	0,116	1000	105	2,46	540
0,023	0,116	1110	116	2,46	540
0,023	0,116	1150	120	2,46	530
0,023	0,116	1200	126	2,46	530
0,023	0,116	1250	131	2,46	515
0,023	0,116	1450	152	2,46	515
0,023	0,116	1500	157	2,46	525
0,023	0,116	1800	188	2,46	589
0,023	0,116	2000	209	2,46	682
0,023	0,116	2500	262	2,46	898
0,028	0,116	680	71	2,94	1069
0,028	0,116	800	84	2,94	1006
0,028	0,116	900	94	2,94	814
0,028	0,116	1050	110	2,94	736
0,028	0,116	1200	126	2,94	667
0,028	0,116	1250	131	2,94	652
0,028	0,116	1350	141	2,94	647

Продовження таблиці Б.5.1

1	2	3	4	5	6
0,028	0,116	1500	157	2,94	638
0,028	0,116	1550	162	2,94	638
0,028	0,116	1800	188	2,94	687
0,028	0,116	2000	209	2,94	760
0,028	0,116	2500	262	2,94	1006
0,031	0,116	700	73	3,25	1128
0,031	0,116	1000	105	3,25	907
0,031	0,116	1100	115	3,25	863
0,031	0,116	1200	126	3,25	775
0,031	0,116	1350	141	3,25	760
0,031	0,116	1400	147	3,25	736
0,031	0,116	1500	157	3,25	736
0,031	0,116	1680	176	3,25	736
0,031	0,116	1800	188	3,25	775
0,031	0,116	2000	209	3,25	844
0,031	0,116	2500	262	3,25	1089
0,040	0,116	750	79	4,28	1511
0,040	0,116	1000	105	4,28	1310
0,040	0,116	1100	115	4,28	1246
0,040	0,116	1200	126	4,28	1167
0,040	0,116	1250	131	4,28	1104
0,040	0,116	1500	157	4,28	1089
0,040	0,116	1800	188	4,28	1089
0,040	0,116	2000	209	4,28	1158
0,040	0,116	2500	262	4,28	1393

Додаток Б.6

Таблиця Б.6.1

Експериментальні дані дослідження перепаду тиску в апараті. Крок між елементами контактної пристрою в досліджуваній ділянці 0 мм

$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$n, \text{ об/хв}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$w_z, \text{ м/с}$	$\Delta P, \text{ Па}$
1	2	3	4	5	6
0,016	0	0	0	1,74	123
0,016	0	500	52	1,74	152
0,016	0	1000	105	1,74	245
0,016	0	1500	157	1,74	392
0,016	0	2000	209	1,74	559
0,016	0	2500	262	1,74	775
0,023	0	0	0	2,46	231
0,023	0	500	52	2,46	255
0,023	0	1000	105	2,46	348
0,023	0	1500	157	2,46	500
0,023	0	2000	209	2,46	697
0,023	0	2500	262	2,46	942
0,028	0	0	0	2,94	309
0,028	0	500	52	2,94	334
0,028	0	1000	105	2,94	432
0,028	0	1500	157	2,94	598
0,028	0	2000	209	2,94	824
0,028	0	2500	262	2,94	1064
0,031	0	0	0	3,25	378
0,031	0	500	52	3,25	417
0,031	0	1000	105	3,25	500
0,031	0	1500	157	3,25	667
0,031	0	2000	209	3,25	898
0,031	0	2500	262	3,25	1153
0,040	0	0	0	4,28	633
0,040	0	500	52	4,28	677
0,040	0	1000	105	4,28	770
0,040	0	1500	157	4,28	922
0,040	0	2000	209	4,28	1138

Продовження таблиці Б.6.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0	2500	262	4,28	1437
0,044	0	0	0	4,70	755
0,044	0	500	52	4,70	804
0,044	0	1000	105	4,70	883
0,044	0	1500	157	4,70	1035
0,044	0	2000	209	4,70	1261
0,016	0,116	560	59	1,74	795
0,016	0,116	840	88	1,74	760
0,016	0,116	965	101	1,74	579
0,016	0,116	1035	108	1,74	540
0,016	0,116	1300	136	1,74	540
0,016	0,116	1380	144	1,74	510
0,016	0,116	1440	151	1,74	451
0,016	0,116	1480	155	1,74	427
0,016	0,116	1585	166	1,74	451
0,016	0,116	1650	173	1,74	476
0,016	0,116	1720	180	1,74	491
0,016	0,116	1800	188	1,74	515
0,016	0,116	2000	209	1,74	584
0,016	0,116	2500	262	1,74	770
0,023	0,116	650	68	2,46	1006
0,023	0,116	770	81	2,46	981
0,023	0,116	900	94	2,46	922
0,023	0,116	1015	106	2,46	819
0,023	0,116	1090	114	2,46	760
0,023	0,116	1125	118	2,46	746
0,023	0,116	1450	152	2,46	736
0,023	0,116	1500	157	2,46	672
0,023	0,116	1560	163	2,46	647
0,023	0,116	1680	176	2,46	672
0,023	0,116	1800	188	2,46	697
0,023	0,116	2000	209	2,46	770
0,023	0,116	2500	262	2,46	981
0,028	0,116	700	73	2,94	1153
0,028	0,116	950	99	2,94	1069

Продовження таблиці Б.6.1

1	2	3	4	5	6
0,028	0,116	1020	107	2,94	1040
0,028	0,116	1120	117	2,94	898
0,028	0,116	1300	136	2,94	873
0,028	0,116	1450	152	2,94	873
0,028	0,116	1530	160	2,94	834
0,028	0,116	1570	164	2,94	790
0,028	0,116	1700	178	2,94	790
0,028	0,116	1720	180	2,94	800
0,028	0,116	1800	188	2,94	824
0,028	0,116	2000	209	2,94	893
0,028	0,116	2500	262	2,94	1138
0,031	0,116	760	80	3,25	1261
0,031	0,116	915	96	3,25	1187
0,031	0,116	1030	108	3,25	1143
0,031	0,116	1090	114	3,25	1035
0,031	0,116	1140	119	3,25	1001
0,031	0,116	1200	126	3,25	991
0,031	0,116	1400	147	3,25	991
0,031	0,116	1520	159	3,25	966
0,031	0,116	1600	167	3,25	907
0,031	0,116	1700	178	3,25	907
0,031	0,116	1750	183	3,25	907
0,031	0,116	1800	188	3,25	932
0,031	0,116	2000	209	3,25	1006
0,031	0,116	2500	262	3,25	1261
0,040	0,116	930	97	4,28	1741
0,040	0,116	1020	107	4,28	1579
0,040	0,116	1110	116	4,28	1481
0,040	0,116	1140	119	4,28	1447
0,040	0,116	1400	147	4,28	1447
0,040	0,116	1500	157	4,28	1422
0,040	0,116	1600	167	4,28	1339
0,040	0,116	1640	172	4,28	1315
0,040	0,116	1750	183	4,28	1315
0,040	0,116	1800	188	4,28	1324

Продовження таблиці Б.6.1

1	2	3	4	5	6
0,040	0,116	2000	209	4,28	1408
0,040	0,116	2500	262	4,28	1687

Додаток В.1

Таблиця В.1.1

**Експериментальні дані дослідження масовіддачі в газовій фазі
(система аміак-вода)**

Δr , мм	G , м ³ /с	L , м ³ /(м ² · с)	n , об/хв	ω , рад/с	w_{Σ} , м/с	$\beta_{y\nu}$, кмоль / (м ³ ·с · ΔY_{cp})
1	2	3	4	5	6	7
20	0,0164	0,116	700	73	1,74	0,335
20	0,0164	0,116	900	94	1,74	0,516
20	0,0164	0,116	1100	115	1,74	0,632
20	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,630
20	0,0164	0,116	2000	209	1,74	0,630
20	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,630
20	0,0277	0,116	1500	157	2,94	0,870
20	0,0403	0,116	1500	157	4,28	1,270
20	0,0443	0,116	1500	157	4,70	1,350
20	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,630
20	0,0164	0,105	1500	157	1,74	0,710
20	0,0164	0,091	1500	157	1,74	0,695
20	0,0164	0,063	1500	157	1,74	0,600
20	0,0164	0,049	1500	157	1,74	0,470
10	0,0164	0,116	700	73	1,74	0,480
10	0,0164	0,116	900	94	1,74	0,479
10	0,0164	0,116	1100	115	1,74	0,400
10	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,341
10	0,0164	0,116	2000	209	1,74	0,265
10	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,51
10	0,0277	0,116	1500	157	2,94	0,68
10	0,0403	0,116	1500	157	4,28	0,89
10	0,0443	0,116	1500	157	4,70	0,96
10	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,51
10	0,0164	0,105	1500	157	1,74	0,625
10	0,0164	0,091	1500	157	1,74	0,6
10	0,0164	0,063	1500	157	1,74	0,475
10	0,0164	0,049	1500	157	1,74	0,35
5	0,0164	0,116	700	73	1,74	0,570
5	0,0164	0,116	900	94	1,74	0,591
5	0,0164	0,116	1100	115	1,74	0,553
5	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,419

Продовження таблиці В.1.1

1	2	3	4	5	6	7
5	0,0164	0,116	2000	209	1,74	0,335
5	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,570
5	0,0277	0,116	1500	157	2,94	0,720
5	0,0403	0,116	1500	157	4,28	1,000
5	0,0443	0,116	1500	157	4,70	1,080
5	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,570
5	0,0164	0,105	1500	157	1,74	0,660
5	0,0164	0,091	1500	157	1,74	0,640
5	0,0164	0,063	1500	157	1,74	0,515
5	0,0164	0,049	1500	157	1,74	0,415
3	0,0164	0,116	700	73	1,74	0,726
3	0,0164	0,116	900	94	1,74	0,730
3	0,0164	0,116	1100	115	1,74	0,710
3	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,423
3	0,0164	0,116	2000	209	1,74	0,351
3	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,691
3	0,0277	0,116	1500	157	2,94	0,956
3	0,0403	0,116	1500	157	4,28	1,362
3	0,0443	0,116	1500	157	4,70	1,414
3	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,730
3	0,0164	0,105	1500	157	1,74	0,770
3	0,0164	0,091	1500	157	1,74	0,760
3	0,0164	0,063	1500	157	1,74	0,696
3	0,0164	0,049	1500	157	1,74	0,600
1,5	0,0164	0,116	700	73	1,74	0,532
1,5	0,0164	0,116	900	94	1,74	0,530
1,5	0,0164	0,116	1100	115	1,74	0,532
1,5	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,476
1,5	0,0164	0,116	2000	209	1,74	0,351
1,5	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,530
1,5	0,0277	0,116	1500	157	2,94	0,703
1,5	0,0403	0,116	1500	157	4,28	0,934
1,5	0,0443	0,116	1500	157	4,70	1,043
1,5	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,530
1,5	0,0164	0,105	1500	157	1,74	0,640
1,5	0,0164	0,091	1500	157	1,74	0,627
1,5	0,0164	0,063	1500	157	1,74	0,491
1,5	0,0164	0,049	1500	157	1,74	0,387
0	0,0164	0,116	700	73	1,74	0,691
0	0,0164	0,116	900	94	1,74	0,580
0	0,0164	0,116	1100	115	1,74	0,374

Продовження таблиці В.1.1

1	2	3	4	5	6	7
0	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,374
0	0,0164	0,116	2000	209	1,74	0,306
0	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,580
0	0,0277	0,116	1500	157	2,94	0,732
0	0,0403	0,116	1500	157	4,28	1,030
0	0,0443	0,116	1500	157	4,70	1,144
0	0,0164	0,116	1500	157	1,74	0,580
0	0,0164	0,105	1500	157	1,74	0,732
0	0,0164	0,091	1500	157	1,74	0,627
0	0,0164	0,063	1500	157	1,74	0,566
0	0,0164	0,049	1500	157	1,74	0,567

Додаток В.2

Таблиця В.2.1

**Експериментальні дані дослідження масовіддачі в рідині
(система CO₂ - вода)**

Δr , мм	G , м ³ /с	L , м ³ /(м ² · с)	n , об/хв	ω , рад/с	w_z , м/с	β_{xv} , кмоль / (м ³ ·с · ΔX_{cp})
1	2	3	4	5	6	7
20	0,0164	0,116	700	73	1,74	4,652
20	0,0164	0,116	900	94	1,74	5,088
20	0,0164	0,116	1100	115	1,74	5,340
20	0,0164	0,116	1500	157	1,74	5,615
20	0,0164	0,116	2000	209	1,74	5,622
20	0,0164	0,116	2500	262	1,74	5,620
20	0,0164	0,116	1500	157	1,74	5,615
20	0,0277	0,116	1500	157	2,94	8,858
20	0,0403	0,116	1500	157	4,28	12,037
20	0,0443	0,116	1500	157	4,70	13,197
20	0,0164	0,116	1500	157	1,74	5,615
20	0,0164	0,105	1500	157	1,74	5,491
20	0,0164	0,091	1500	157	1,74	5,524
20	0,0164	0,063	1500	157	1,74	5,267
20	0,0164	0,049	1500	157	1,74	4,847
10	0,016	0,116	700	73	1,74	5,289
10	0,016	0,116	900	94	1,74	5,589
10	0,016	0,116	1100	115	1,74	5,717
10	0,016	0,116	1500	157	1,74	5,907
10	0,016	0,116	2000	209	1,74	5,958
10	0,016	0,116	2500	262	1,74	5,954
10	0,016	0,116	1500	157	1,74	5,907
10	0,028	0,116	1500	157	2,94	9,134
10	0,040	0,116	1500	157	4,28	12,636
10	0,044	0,116	1500	157	4,70	13,997
10	0,016	0,116	1500	157	1,74	5,907
10	0,016	0,105	1500	157	1,74	5,771
10	0,016	0,091	1500	157	1,74	5,800

Продовження таблиці В.2.1

1	2	3	4	5	6	7
10	0,016	0,063	1500	157	1,74	5,502
10	0,016	0,049	1500	157	1,74	5,117
5	0,016	0,116	700	73	1,74	5,858
5	0,016	0,116	900	94	1,74	6,103
5	0,016	0,116	1100	115	1,74	6,330
5	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,456
5	0,016	0,116	2000	209	1,74	6,456
5	0,016	0,116	2500	262	1,74	6,456
5	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,456
5	0,028	0,116	1500	157	2,94	10,253
5	0,040	0,116	1500	157	4,28	14,139
5	0,044	0,116	1500	157	4,70	15,542
5	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,550
5	0,016	0,105	1500	157	1,74	6,491
5	0,016	0,091	1500	157	1,74	6,499
5	0,016	0,063	1500	157	1,74	6,107
5	0,016	0,049	1500	157	1,74	5,945
3	0,016	0,116	700	73	1,74	5,500
3	0,016	0,116	900	94	1,74	5,811
3	0,016	0,116	1100	115	1,74	6,112
3	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,270
3	0,016	0,116	2000	209	1,74	6,275
3	0,016	0,116	2500	262	1,74	6,263
3	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,318
3	0,028	0,116	1500	157	2,94	9,917
3	0,040	0,116	1500	157	4,28	13,395
3	0,044	0,116	1500	157	4,70	14,696
3	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,318
3	0,016	0,105	1500	157	1,74	6,178
3	0,016	0,091	1500	157	1,74	6,164
3	0,016	0,063	1500	157	1,74	5,756
3	0,016	0,049	1500	157	1,74	5,591
1,5	0,016	0,116	700	73	1,74	5,901
1,5	0,016	0,116	900	94	1,74	6,138
1,5	0,016	0,116	1100	115	1,74	6,504

Продовження таблиці В.2.1

1	2	3	4	5	6	7
1,5	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,547
1,5	0,016	0,116	2000	209	1,74	6,504
1,5	0,016	0,116	2500	262	1,74	6,536
1,5	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,547
1,5	0,028	0,116	1500	157	2,94	10,235
1,5	0,040	0,116	1500	157	4,28	14,370
1,5	0,044	0,116	1500	157	4,70	15,513
1,5	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,618
1,5	0,016	0,105	1500	157	1,74	6,558
1,5	0,016	0,091	1500	157	1,74	6,540
1,5	0,016	0,063	1500	157	1,74	6,183
1,5	0,016	0,049	1500	157	1,74	6,015
0	0,016	0,116	700	73	1,74	5,603
0	0,016	0,116	900	94	1,74	5,847
0	0,016	0,116	1100	115	1,74	6,075
0	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,204
0	0,016	0,116	2000	209	1,74	6,204
0	0,016	0,116	2500	262	1,74	6,238
0	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,204
0	0,028	0,116	1500	157	2,94	9,666
0	0,040	0,116	1500	157	4,28	13,589
0	0,044	0,116	1500	157	4,70	14,675
0	0,016	0,116	1500	157	1,74	6,204
0	0,016	0,105	1500	157	1,74	6,118
0	0,016	0,091	1500	157	1,74	6,099
0	0,016	0,063	1500	157	1,74	5,662
0	0,016	0,049	1500	157	1,74	5,518

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Шостка-Хімпродукт»



П'єцух В.М.

2010 р.

Акт

промислового випробування ректифікаційної установки на базі відцентрових масообмінних апаратів для утилізації оцто-водяної суміші на виробництві ацетату етиленгліколю ТОВ «Шостка-Хімпродукт»

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету на ТОВ «Шостка-Хімпродукт» проведені промислові випробування ректифікаційної установки, побудованій на базі відцентрових масообмінних апаратів, для утилізації відходу виробництва ацетату етиленгліколю. В результаті утилізації досягається повернення цільового продукту, концентрованої оцтової кислоти, в технологічний процес виробництва.

Дослідно-промислові випробування проведені за таких умов:

- в якості вихідного продукту використовувалася оцтова кислота з концентрацією 30-35% ;
- навантаження по вихідному продукту становило 25-30 м³/год;
- концентрація кислоти на виході складала до 99 %;
- вихід цільового продукту становив 0,0167 м³/год;
- гідравлічний опір установки (загальний) – 1,3 кПа.

На основі аналізів результатів випробувань зроблені такі висновки:

- встановлена роботоздатність та висока ефективність ректифікаційної установки на базі відцентрових масообмінних апаратів для утилізації оцто-водяної суміші в виробництві ацетату етиленгліколю;

- габаритні розміри та вимоги до виробничих площ значно менші в порівнянні з традиційним колонним масообмінним обладнанням;
- гідравлічний опір апарату в декілька разів нижчий за аналогічні рішення на базі колонної апаратури;
- рекомендувати установку для широкого впровадження в промисловість.

Випробування показали, що установка має високу ефективність, компактність і стабільність робочих показників в умовах тривалої експлуатації.

Використання високоефективного методу утилізації відходу виробництва ацетату етиленгліколю на базі відцентрового масообмінного обладнання запропоновано Сумським державним університетом в дослідженнях доц. Лазненко Д.О. та ас. Сидоренко С.В.

Від ТОВ «Шостка-Хімпродукт»

Головний інженер



Краснов В.А.

Від Сумського державного університету

Науковий керівник, к.т.н., доц.



Лазненко Д.А.

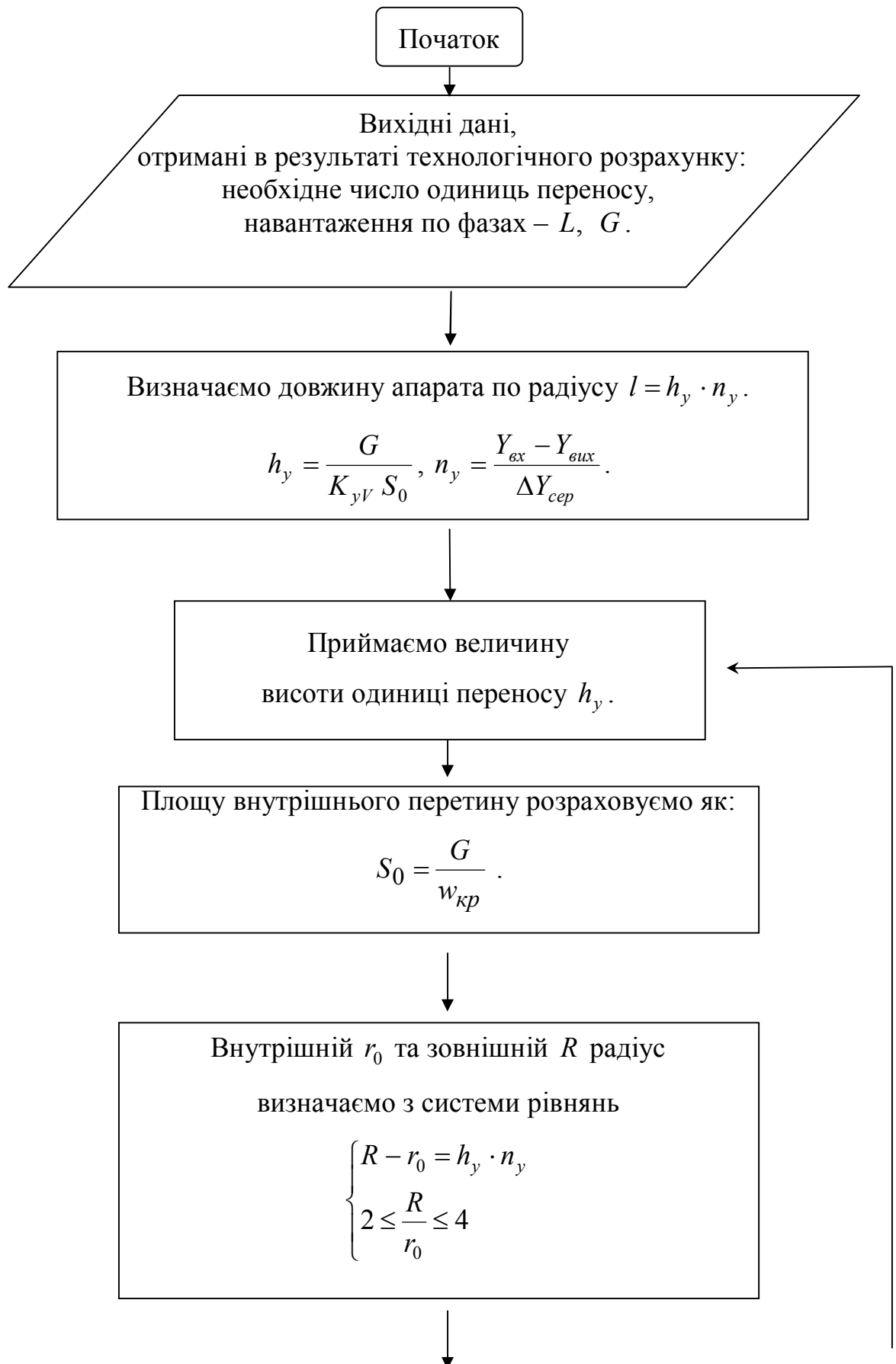
Відповідальний виконавець



Сидоренко С.В.

Додаток Д

Блок-схема алгоритму інженерного розрахунку ВМА.



Значення ширини ротора h знаходимо з співвідношення:

$$h = \frac{S_0}{2\pi r_0}.$$

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі визначаємо з критеріального рівняння для відповідної фази

$$Nu_G = 0,038 Re^{1,09} \left(\frac{L}{G}\right)^{0,13}, \quad Nu_L = 720 Re^{0,92} \left(\frac{L}{G}\right)^{0,2}.$$

Перевіряємо висоту одиниці переносу

ні

Уточнюємо h_y

Необхідна швидкість обертання (об/хв) визначається як:

$$w_{об} = 60 \cdot 2\pi \sqrt{\frac{2 a_{вц.сер.}}{R + r_0}},$$

$$a_{вц.сер.} = 1500 \text{ м/с}^2.$$

Визначення гідравлічного опору.

Повний гідравлічний опір:

$$\Delta P = \Delta P_{сyx} \cdot f_L.$$

Гідравлічний опір сухого апарата:

$$\Delta P_{\text{сyx}} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_i + \Delta P_{c_i}), \text{ де:}$$

$$\Delta P_i = P(r_{i+1}) - P(r_i) = k_{\text{вх}} \lambda \left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) \frac{\rho_c}{2} (w_{r_{i+1}}^2 + w_{\varphi_{i+1}}^2),$$

$$\Delta P_c = \xi_c \frac{\rho w^2}{2}.$$

Фактор зрошення f_L в робочому режимі визначається як:

$$f_L = 1,97 \cdot \text{Re}^{0,14} Fr_{\text{вц}}^{0,12}.$$

Результат розрахунку:

- геометричні розміри контактної пристрою – R , r_0 та h ;
- швидкість обертання ротора ω ;
- величина гідравлічного опору ΔP .

Кінець

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] / Кабінет міністрів України. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc>.
2. U.S. Patent 4283255. International Class: B 01 D 3/30 Mass transfer process. / Ramshaw C., Mallinson R.; assignee Imperial Chemical Industries Limited (London, GB). – № 05/963886; filed 27.11.78; patented 11.08.81.
3. Ramshaw C. «HiGee» distillation. An example of process intensification / C. Ramshaw // Chemistry Engineering Science. – 1983. – № 15. – P. 13–14.
4. Сиренко В. И. Гидродинамика и массообмен при двухфазных пленочно-дисперсных потоках в высокоскоростном центробежном аппарате: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Сиренко Виталий Иванович. – Москва, 1992. – 142 с.
5. Лазненко Д. О. Розробка і дослідження малогабаритних апаратів для процесів ректифікації: дис. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Лазненко Дмитро Олексійович. – Суми, 2001. – 151 с.
6. Бубулікова Є. В. Закономірності гідродинаміки та масопередачі процесу ректифікації у відцентровому апараті : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / Є. В. Бубликова. – Харків, 2007. – 22 с.
7. Питак И. В. Гидравлическая характеристика роторного массообменного аппарата / И. В. Питак, О. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2007. – № 32. – С. 93–100.
8. Питак И. В. Определение эффективности очистки газовой воздушного потока в роторном массообменном аппарате / И. В. Питак, О. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2007. – № 5/4 (29). – С. 9–12.

9. Modeling ozone contacting in a rotating packed bed / Y. H. Chen, C. Y. Chang, W. L. Su [and oth.] // *Industrial Engineering Chemistry Research*. – 2004. – № 43. – P. 228–236.
10. Lin C. C. Distillation in a rotating packed bed / C. C. Lin, T. J. Ho., W. T. Liu // *Journal of chemical engineering of Japan*. – 2002. – № 12. – P. 1298–1304.
11. Ming Xu. CDF modeling of gas-liquid flow and mass transfer in rotating packed beds / Ming Xu, Jianwen Zhang, Jianfeng Chen // *Sixth World Congress on Computational Mechanics: international scientific congress, 5-10 of September 2004. : conferences thesis – Beijing : Tsinghua University Press, 2004. – P. 48–52.*
12. Rao D. P. Process intensification in rotating packed bed (HIGEE): An Appraisal / D. P. Rao, A. Bhowal, P. S. Goswami // *Industrial Engineering and Chemistry Research* – 2004. – № 43. – P. 1150–1162.
13. Chandra A. Characteristics of flow in a rotating packed bed (HIGEE) with split packing / A. Chandra, P. S. Goswami, D. P. Rao // *Industrial Engineering and Chemistry Research* – 2005. – № 44. – P. 4051–4060.
14. Burns J. R. Process intensification: Visual study of liquid maldistribution in rotating packed beds / J. R. Burns, C. Ramshaw // *Chemistry Engineering Science* – 1996. – Vol. 51. – №8. – P. 1347–1352.
15. Chen Y. H. Mass transfer in a rotating packed bed with viscous newtonian and non-newtonian fluids / Y. H. Chen, C. C. Lin, H. S. Liu // *Industrial Engineering and Chemistry Research* – 2005. – № 44 (4). – P. 1043–1051.
16. Chen Y. H. Mass transfer in a rotating packed bed with various radii of the bed / Y. H. Chen, C. C. Lin, H. S. Liu // *Industrial Engineering and Chemistry Research* – 2005. – № 44 (20). – P. 7868–7875.
17. Process intensification in a trickle-bed reactor: experimental studies / S. K. Dhiman, Vishal Verma, D. P. Rao [and oth.] // *AIChE Journal* – 2005. – Vol. 51, № 12. – P. 3186–3192.

18. Packing characteristics for mass transfer in a rotating packed bed / Y. S. Chen, F. Y. Lin, C. C. Lin [and oth.] // *Industrial Engineering and Chemistry Research* – 2006. – № 45 (20). – P. 6846–6853.

19. Nascimento V. S. Experimental study of a rotating packed bed distillation column / V. S. Nascimento, T. M. K. Ravagnani, J. A. F. R. Pereira // *Brazilian Journal of Chemistry Engineering* – Vol. 26, № 1. – 2009. – P. 219–226.

20. Combined photolysis and catalytic ozonation of dimethyl phthalate in a high-gravity rotating packed bed / C. C Chang, C. Y. Chiu, C. Y. Chang [and oth.] // *Journal of Hazardous Materials* – № 161. – 2009. – P. 287–293.

21. Шервуд Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки ; пер. с англ. канд. хим. наук Н. Н. Кулова ; под ред. чл.-корр АН СССР В. А. Малюсова. – М. : Химия, 1982. – 695 с. – (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии).

22. Задорский В. М. Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода / В. М. Задорский – К. : Техника, 1989. – 208 с.

23. Рамм В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М. : Химия, 1976. – 658 с.

24. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура / [Олевский В. М., Ручинский Р. В., Кашников А. М., Чернышев В. И.] ; под ред. В. М. Олевского. – М. : Химия, 1988. – 240 с. – (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии).

25. Броунштейн Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах / Б. И. Броунштейн, Г. А. Фишбейн – Л. : Химия, 1977. – 280 с.

26. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин – М. : Наука, 1987 – 464 с.

27. Пажи Д. Г. Распыливающие устройства в химической промышленности / Д. Г. Пажи, А. А. Корягин, Э. Л. Ламм ; под ред. Д. Г. Пажи. – М. : Химия, 1975. – 200 с.

28. Пажи Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов – М. : Химия, 1984. – 256 с. – (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии).

29. Распыливание жидкости / Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягодкин В. И. – [2-е изд., доп. и перераб.] – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.

30. Белоглазов И. Н. Интенсификация и повышение эффективности химико-технологических процессов / И. Н. Белоглазов, А. И. Муравьев – Л. : Химия, 1988. – 206 с.

31. Пляцук Л. Д. Гидродинамика и массообмен в прямоточном массообменном аппарате с регулярной подвижной насадкой: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Пляцук Леонид Дмитриевич. – Казань, 1982. – 206 с.

32. Холин Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости / Б. Г. Холин – М. : Машиностроение, 1977. – 152 с.

33. Склабинский В. И. Теоретические основы расчета и проектирования вихревых распыливающих противоточных массообменных аппаратов: дисс. ... доктора техн. наук : 05.17.08 / Склабинский Всеволод Иванович. – Сумы, 2000. – 295 с.

34. Олевский В. М. Ректификация термически нестойких продуктов. / В. М. Олевский, В. Р. Ручинский – М. : Химия, 1972. – 200 с.

35. Кафаров В. В. Основы массопередачи: Системы газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость / В. В. Кафаров. – [3-е изд, перераб. и доп.] – М. : Высшая школа, 1979. – 439 с.

36. Коган В. Б. Оборудование для разделения смесей под вакуумом / В. Б. Коган, М. А. Харисов – Л.: Машиностроение, 1976. – 376 с.

37. Пляцук Л. Д. Вплив конструктивних параметрів контактної пристрою на гідродинаміку в роторному ректифікаційному апараті / Л. Д. Пляцук, Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Вісник Кременчуцького

державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – 2006. – Вип. 5/2006(40). – С. 106–109.

38. Пляцук Л. Д. Организация масообменных процессов в поле центробежных сил / Л. Д. Пляцук, Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Современные проблемы инновационных технологий в образовании и науке : Междунар. науч.-техн. конф., 12-13 июня 2009 г. : труды конф. – Шимкент, 2009. – С. 191–196.

39. Интенсификация технологических процессов с использованием центробежного поля / И. И. Поникаров, В. А. Булкин, О. А. Перелыгин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 1998. – № 1. – С. 96–103.

40. Якуба О. Р. Розрахунок фракційної ефективності апаратів з зустрічними закрученими потоками / О. Р. Якуба, М. Ю. Савченко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2008. – Випуск 1(17). – С. 34–39.

41. Якуба О. Р. Удосконалення апаратів з зустрічними потоками для пиловловлення / О. Р. Якуба, В. В. Касьянчук, М. Ю. Савченко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2008. – Випуск 2(18). – С. 85–89.

42. U.S. Patent 928118. Apparatus for subjecting gas or vapors to the action of liquids / Fowler C. H., Medley E. A.; filed 10.12.1908; patented 13.07.1909.

43. U.S. Patent 1050013. Apparatus for subjecting gas or vapors to the action of liquids / Fowler C. H., Medley E. A.; filed 28.10.1912; patented 7.01.1913.

44. U.S. Patent 2003308. Centrifugal fractionating method and apparatus / Podbielniak W. J.; filed 10.08.1932; patented 04.06.1935.

45. U.S. Patent 2044996. Method of counter current contact of fluids be centrifugal action / Podbielniak W. J.; filed 18.08.1930; patented 23.06.1936.

46. U.S. Patent 2093645. Method and apparatus of refining hydrocarbon oil / Podbielniak W. J.; filed 05.02.1935; patented 21.09.1937.

47. U.S. Patent 2109375. Apparatus for effecting counter current contact between fluids / Podbielniak W. J.; filed 25.06.1936; patented 22.02.1938.

48. U.S. Patent 2281796. Art of effecting counter current contact between fluids / Podbielniak W. J.; filed 08.03.1935; patented 05.03.1942.

49. U.S. Patent 3233880. Continuous centrifugal vapor-liquid contactor / Podbielniak W. J.; filed 03.08.1962; patented 08.02.1966.

50. U.S. Patent 3336015. Continuous centrifugal deodorizer / Podbielniak W. J.; filed 28.09.1965; patented 08.02.1967.

51. Исследование массопередачи на контактных ступенях из коаксиальных отбортованных цилиндров роторно-пленочной колонны / Ручинский В. Р., Биркалова Г. И., Саркисян Н. М. [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – т. 27. – № 6. – 1983. – С. 830–832.

52. Архаров А. М. О разделении воздуха в центробежных ректификационных аппаратах / А. М. Архаров // Химическое машиностроение. – 1951. – № 3. – С. 8–12.

53. Гельперин Н. И. Исследование процесса ректификации бинарных смесей в вертикальном ротационном аппарате / Н. И. Гельперин, М. С. Хаценко // Журнал прикладной химии. – 1952. – вып. 6. – С. 610–613.

54. Александровский А. А. Исследование гидродинамики и массообмена в роторном абсорбере: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Александровский Алексей Александрович. – Казань, 1962. – 238 с.

55. Аношин И. М. Сравнительная характеристика эффективности ротационных аппаратов при ректификации спирта / И. М. Аношин, Р. В. Корень // Ферментная и спиртовая промышленность. – 1966. – № 3. – С. 17–20.

56. Аношин И. М. Исследование ротационного аппарата с турбулизирующей решёткой при ректификации / И. М. Аношин, В. Н. Малин // Известия ВУЗов СССР. Пищевая технология. – 1966. – № 4. – С. 125–130.

57. Карих Е. Н. Исследование гидродинамических условий течения двухфазного потока и их влияние на массообмен в роторном секционном

ректификаторе: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Карих Евгений Николаевич. – Краснодар, 1979. – 266 с.

58. А.с.1623679 СССР МКИ В 01 D 3/30 Тепломассообменный аппарат / Ю. В. Шкарупа, В. Я. Стороженко, А. А. Лукаш (СССР). – №4663728/26; заявл. 19.12.88; опубл.30.01.91, Бюл.№ 4.

59. А.с. 1528523 СССР МКИ В 01 D 3/30 Тепломассообменный аппарат / Ю. В. Шкарупа, И. М. Плехов, В. Я. Стороженко, В. Н. Гуляев (СССР). – №4294667/31-26; заявл. 10.08.87; опубл.15.12.89, Бюл.№46.

60. Сафиуллин Р. Г. Научные основы современных технологий распыливания воды в системах вентиляции и кондиционирования воздуха : автореф. дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук : спец. 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» / Р. Г. Сафиуллин . – М., 2010. – 34 с.

61. Ластовцев А. М. Уравнение дробления жидкостей вращающимися распылителями / А. М. Ластовцев // Труды Московского института химического машиностроения. – 1957. – т. 30. – С. 45–48.

62. Кутателадзе С. С. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах / С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков – Новосибирск : Наука, 1984. – 301 с.

63. Авруцкий М. М. Анализ стадий массообмена в ротационном тарельчатом аппарате / М. М. Авруцкий, Г. П. Соломаха // Теоретические основы химической технологии. – 1972. – т. 6. – № 3. – С. 335–342.

64. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу ; пер. с англ. канд. техн. наук В. С. Данилина, Г. Н. Николаева, Г. В. Циклаури ; под ред. д-ра техн. наук, проф. М. Е. Дейча – М. : Мир, 1971. – 536 с.

65. Справочник по пыле- и золоулавливанию / [Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И. и др.] ; под общ. ред. А. А.Русанова. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.

66. Розен А. М. Массоотдача в одиночных каплях. / А. М. Розен, А. И. Беззубова // Теоретические основы химической технологии. – 1968. – т. 2. – № 6. – С. 850–856.

67. Маймеков З. К. Исследование массообмена между каплями воды и газом в процессе абсорбции кислорода из воздуха / З. К. Маймеков, Н. А. Малофеев, В. А. Малюсов, И. В. Подгорная // Теоретические основы химической технологии. – 1983. – т. 17. – № 2. – С. 165–171.

68. Маймеков З. К. Массообмен между каплями жидкости и газом в процессах абсорбции и испарения: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Маймеков Зарлык Капарович. – Москва, 1984. – 202 с.

69. Поникаров С. И. Дробление капель в центробежных аппаратах химических производств: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Поникаров Сергей Иванович. – Казань, 1984. – 164 с.

70. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З. Р. Горбис. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.

71. Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газообразной среде / Н. А. Фукс – М. : Издательство Академии наук СССР, 1958. – 92 с. – (Итоги науки. Физико-математические науки / Академия наук СССР ; т. 1).

72. Гегузин Я. Е. Капля / Я. Е. Гегузин – М. : Наука, 1973. – 160 с. – (Научно-популярная серия / Академия наук СССР).

73. Цирельман Н. М. Моделирование процессов тепломассообмена во входном устройстве газотурбинной установки / Н. М. Цирельман, Р. Р. Мустафин // Вестник Севастопольского государственного технического университета. – 2009. – Вып. 97. – С. 52–58.

74. Успенский В. А. Тепло- и массообмен в слое, содержащем капли жидкости / В. А. Успенский, В. В. Губачев // Теоретические основы химической технологии. – 1980. – № 5. – С. 773–776.

75. Патент на корисну модель №42657 Україна, МПК В 01 D 3/30. Відцентровий тепломасообмінний апарат / Лазненко Д. О., Сидоренко С. В.;

Заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u200902470 ; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13.

76. Лазненко Д. О. Дослідження гідравлічного опору відцентрового масообмінного апарату / Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2009. – Вип. 35. – Т. 2. – С. 122–127.

77. Романков П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Л. : Химия, 1974. – 288 с.

78. Машины и аппараты химических производств / [Чернобыльский И. И., Бондарь А. Г., Гаевский Б. А. и др.] ; под ред. д-ра техн. наук, проф. И. И. Чернобыльского. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 456 с.

79. Шарло Г. Методы аналитической химии. Количественный анализ неорганических соединений / Г. Шарло; пер. с фр., дополн. и общ. ред. проф. Ю. Ю. Лурье. – Л. : Химия, 1965. – 976 с.

80. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных и сточных вод / Ю. Ю. Лурье. – М. : Химия, 1984. – 488 с.

81. Основы аналитической химии. В 2 кн. Кн.1. Общие вопросы. Методы разделения / [Ю. А. Золотов, Е. Н. Дорохова, В. И. Фадеева и др.] ; под ред. Ю. А. Золотова. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш.шк., 2002. – 351 с.

82. Отто М. Современные методы аналитической химии (в 2-х томах). Т. 1. / М. Отто ; под ред. А. В. Гармаша. – М. : Техносфера, 2003. – 407 с.

83. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион ; пер. с англ. ; под ред. канд. техн. наук Э. К. Лецкого и д-ра техн. наук Е. В. Марковой. – М. : Мир, 1981. – 520 с.

84. Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин ; под общ. ред. проф. М. Е. Позина. – [6-е изд., испр.]. – Л. : Химия, 1971. – 824 с.

85. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер. с англ. Е. Г. Коваленко ; под ред. чл.-корр. АН СССР Н. П. Бусленко. – М. : Мир, 1972. – 374 с.

86. Горский В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели статики) / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер. – М. : Metallurgia, 1974 – 264 с.

87. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

88. Химическая гидродинамика: Справочное пособие / [Кутепов М. А., Полянин А. Д., Запрянов З. Д. и др.]. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.

89. Френкель Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.

90. Сидоренко С. В. Визначення розміру крапель при диспергуванні рідини в малогабаритному роторному ректифікаційному апараті / С. В. Сидоренко // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – № 4.– С. 18–23.

91. Експериментальні дослідження гідродинаміки рідкої фази в контактному пристрої відцентрового масообмінного апарату / С. В. Сидоренко, Д.О. Лазненко, Л.Д. Пляцук [та ін.] // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 6. – С. 16–21.

92. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия : ГОСТ 3826-82. – [Действительный от 01.01.1984]. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 24 с. – (Государственные стандарты Союза ССР).

93. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия : ГОСТ 6613-86. – [Действительный от 01.01.1988]. – М. :

Издательство стандартов, 1988. – 20 с. – (Государственные стандарты Союза ССР).

94. Сетки металлические проволочные. Типы, основные параметры и размеры : ГОСТ 2715-75. – [Действительный от 01.01.1977]. – М. : Издательство стандартов, 1987 (Переиздание). – 32 с. – (Государственные стандарты Союза ССР).

95. Пляцук Л. Д. Визначення гідравлічного опору відцентрового тепломасообмінного апарату / Л. Д. Пляцук, Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – №1. – С. 31–38.

96. Саркисян Н. М. Исследование гидродинамики и массообмена в роторных пленочных аппаратах: дисс. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Саркисян Норик Мурадович. – М., 1980. – 168 с.

97. Keyvani M. Operating characteristics of rotating beds / M. Keyvani, N. S. Gardner // Chemistry Engineering Progress. – 1989. – Vol. 85, № 9. – P. 48–52.

98. Ручинский В. Р. Исследование гидродинамики роторного аппарата / В. Р. Ручинский, Ю. Г. Нечаев, Г. П. Есипов // Труды ГИАП. – 1974. – Вып. 28. – С. 72–80.

99. Ручинский В. Р. Определение гидравлического сопротивления и коэффициента массообмена в жидкой фазе роторного аппарата со спиралеобразными ступенями / В. Р. Ручинский, Ю. Г. Нечаев, Б. А. Гурков // Химическая промышленность. – 1979. – № 10. – С. 679–684.

100. К вопросу о гидродинамике роторных аппаратов / А. Уйхиди, З. Кишш, З. Беркеш [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т. XXII. – С. 356–361.

101. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – М. : Машиностроение, 1992. – 667 с.

102. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский – М. : Гос. изд-во технико-теоретич. литературы, 1950. – 678 с.

103. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 352 с.
104. Репик Е. У. Управление уровнем турбулентности потока / Е. У. Репик, Ю. П. Соседко. – М. : Изд-во Физико-математической литературы, 2002. – 244 с.
105. Репик Е. У. Турбулентный пограничный слой. Методика и результаты экспериментальных исследований / Е. У. Репик, Ю. П. Соседко. – М. : Изд-во Физико-математической литературы, 2007. – 312 с.
106. Колесник А. А. Разработка и исследование пористых вращающихся распылителей жидкости: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Колесник Алексей Алексеевич. – Казань, 1983. – 216 с.
107. Брайнес Я. М. Подобие и моделирование в химической и нефтехимической технологии / Я. М. Брайнес. – М. : Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1961. – 220 с.
108. Поникаров И. И. Каплеобразование при истечении жидкостей из отверстия в поле центробежных сил / И. И. Поникаров, В. В. Кафаров, В. Г. Бочкарев // Журнал прикладной химии. – 1971. – т. 44, вып. 12. – С. 329–331.
109. Сафиуллин Р. Г. Динамика формирования капель при фильтрации через пористое тело / Р. Г. Сафиуллин, Н. Б. Салимов, В. Н. Посохин, Н. А. Николаев // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – т. 38, № 4. – С. 441–445.
110. Сафиуллин Р. Г. Моделирование каплеобразования на смачиваемых элементах / Р. Г. Сафиуллин, В. Н. Посохин В. Н. // Изв. вузов. Строительство. – 2008. – № 3. – С. 77–82.
111. Лабунцов Д. А. Механика двухфазных систем / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов. – М. : Изд-во МЭИ, 2000. – 374 с.
112. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 353 с.

113. Гідродинаміка плівкової взаємодії фаз в роторних ректифікаційних апаратах / Л. Д. Пляцук, Д. О. Лазненко, В. Я. Стороженко [та ін.] // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – № 3. – С. 70–83.

114. Пляцук Л. Д. Дослідження масовіддачі в рідкій фазі при роботі відцентрового масообмінного апарату / Л. Д. Пляцук, Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Хімічна промисловість України. – 2010. – № 1. – С. 27–30.

115. Лазненко Д. О. Дослідження масовіддачі в газовій фазі при роботі відцентрового масообмінного апарату [Електронний ресурс] / Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. – № 2(18). – Режим доступу до журн.: <http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/Nd/2010-2/10ldomta.pdf>.

116. Lin Chia-Chang. Mass Transfer Characteristics of a High-voidage Rotating Packed Bed / Chia-Chang Lin, Wen-Tzong Liu // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2007. – Vol. 13, № 1. – P. 71–78.

117. Lin Chia-Chang. Influence of Liquid Viscosity on Mass Transfer in Rotating Packed Beds / Chia-Chang Lin, Jinn-Tsong Lin, Wen-Tzong Liu // American Institute of Chemical Engineers Annual Meeting, 16–21 of November 2003 : proceedings of the meeting. – San-Francisco, CA, 2003. – P. 334–339.

118. Виговська Г. П. Поводження з відходами в Україні: підсумки і перспективи / Г. П. Виговська, В. С. Міщенко // Сотрудничество для решения проблемы отходов: 5-я Междунар. конф., 2-3 апреля 2008 г. : материалы конф. – Х., 2008. – С. 6–8.

119. Лазненко Д. О. Створення установок рекуперації летких розчинників з використанням роторних тепломасообмінних апаратів / Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов : Междунар. науч.-техн. конф., 2-6 июня 2008 г. : сборник научных статей. – Х., 2008. – С. 400–403.

120. Справочник химика. В 6 т. Т. 3: Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы / [Никольский Б. П.

(гл.ред.), Григоров О. Н, Позин М. Е и др.]; под ред. Б. П. Никольского. – М. : Химия, 1965. – 1008 с.

121. Коган В. Б. Равновесие между жидкостью и паром: Справочное пособие / В. Б. Коган, В. М. Фридман, В. В. Кафаров – М. : Наука, 1966. – 646 с.

122. Стабников В. Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов / В. Н. Стабников – К. : Техника, 1970. – 208 с.

123. Цыганков П. С. Ректификационные установки спиртовой промышленности (расчет, анализ работы, эксплуатация) / П. С. Цыганков. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 336 с.

124. Лазненко Д. О. Технічне рішення утилізації відходу виробництва ацетату етиленгліколю з використанням відцентрового масообмінного обладнання / Д. О. Лазненко, С. В. Сидоренко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2009. – № 15. – С. 3–8.